

T-UES
1506
F 634e
1992
E. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



Eliminación de Hierro y Manganeso en Agua Natural por medio de Aireación y Retención con Lava Volcánica

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

Dinorah del Carmen Flores Meléndez

Marta Lilian Martínez Barrera

Rony Griselda Ortiz Martínez

PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

AGOSTO DE 1992

SAN SALVADOR,

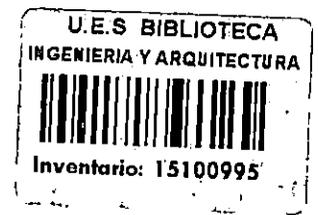
EL SALVADOR,

CENTROAMERICA.



15100995
15100995

Recibido 14 Octubre / 92



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

TRABAJO DE GRADUACION:

"ELIMINACION DE HIERRO Y MANGANESO EN AGUA
NATURAL POR MEDIO DE AIREACION Y RETENCION
CON LAVA VOLCANICA".

COORDINADOR:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "V.M. Segura Lemus".

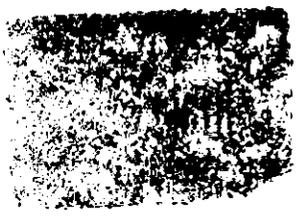
LIC. VICTOR MANUEL SEGURA LEMUS

ASESOR:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Elvia Berenice Huez de Oliva".

DRA. ELVIA BERENICE HUEZO DE OLIVA





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. MIRNA ANTONIETA PERLA DE ANAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. JUAN JESUS SANCHEZ SALAZAR

SECRETARIO:

ING. JOSE RIGOBERTO MURILLO CAMPOS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA


ING. ROBERTO ARISTIDES CASTELLON MURCIA

DIRECTOR



RECONOCIMIENTO

Las autoras de este trabajo de graduación queremos agradecer, especialmente al Licenciado Víctor Manuel Segura Lemus, Doctora Elvia Berenice Huevo de Oliva, Ingeniero Delmy Rico Peña e Ingeniero Gustavo Nery Iraheta, Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), Instituto de Investigaciones Tecnológicas (GEOTECNICO) del Ministerio de Obras Públicas y a la Unidad Productiva de los Talleres de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, por su valiosa ayuda en la realización de esta investigación, a la vez queremos patentizar nuestro agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

Ing. Carlos Roberto Ochoa
Ing. Francisco Chacón
Ing. José Antonio Miranda
Ing. Melba Aracely Hernández de Miranda
Ing. Italo Andrés Córdova Flamenco
Ing. Numa Pompilio Guevara Sánchez
Br. Rosa María Guerrero Hernández
Br. Francisco Wilmer Guevara
Ing. Milton Ulises Navarrete
Ing. Joaquín Reynado
Ing. David Pérez Echegoyén
Br. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya
Ing. Tomás Ortiz
Br. Juan Rodolfo Mendoza
Br. Manuel Antonio Morán
Lic. Gilma de Molina
Ing. Ana Cecilia Díaz Meléndez
Lic. Marta Moreno de Ventura
Lic. Arturo García Mazzini
Dra. Mirian Dubón de Méndez

Lic. María Elisa Vivar de Figueroa
Lic. María Elsa Romero de Zelaya
Ing. Marissa Orantes
Ing. Nohemy de Salinas
Br. Israel Espinal
Sr. José María Cortez
Ing. Cristina Hernández
Ing. Corina Medina
Br. María Alicia Landos
Br. Rutilio Rauda
Lic. Gerson David Argueta
Br. Domingo Gámez
Sr. Máximo Marguéz Cortez
Sr. Jorge Alberto Echeverría
Sr. José Napoleón Machado
Br. Carlos Arturo Menjívar
Br. María Guadalupe Pérez
Sr. Daniel López Rosales
Sr. Juan Esteban García Martínez
Br. Jorge Alberto Rodríguez
Sr. Pilar Antonio Reyes
Sr. Ramón Ramírez
Br. Oscar Antonio Barahona
Br. Daniel Eliseo Martínez
Br. José Elmer Benítez Tobar
Ing. Oscar Eduardo Marroquín
Lic. Ramiro Edgar Méndez Brizuela
Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)
y a todas las personas que de una u otra manera contribu
yeron al desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

A **DIOS TODOPODEROSO**: Dándole gracias por guiarme hasta esta etapa de mi vida y haberme dado la fuerza suficiente para llegar a su fin, coronando así una de mis mayores aspiraciones.

A **MIS PADRES**: Adalex y María Antonia, a quienes realmente debo este triunfo, por su apoyo incondicional y constante preocupación al brindarme la oportunidad de superarme, reiterándoles mi cariño y respeto profundos.

A **MIS HIJOS**: Claudia Carolina y al que todavía viene en camino por ser la inspiración de mis esfuerzos, con la esperanza que todo el tiempo sacrificado siente las bases para un mejor futuro.

A **MI ESPOSO**: Carlos Ernesto, con amor, por su paciencia y comprensión, por estar conmigo durante esta difícil etapa.

A **MIS HERMANOS**: Alex, Antonio y con especial cariño a Carmen por alentarme en todo momento, deseando que logren alcanzar sus metas.

A **MIS AMIGOS**: de quienes he recibido tanto, gracias por el estímulo y la comprensión que me han brindado siempre.

A **MIS PROFESORES Y COMPANEROS**: con respeto y agradecimiento.

A todas las personas que de alguna manera han hecho posible este logro, gracias de todo corazón.

Marta Lilian.

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO, a tí señor que eres mi padre, mi fortaleza y mi esperanza. Te agradezco que me hayas permitido concluir uno de mis proyectos mas importantes, siendo una alegría saber que este logro era tu voluntad.

A MIS PADRES, Dinorah y Mario, con mucho amor y agradecimiento, por su infinito amor e incondicional ayuda y apoyo durante toda mi vida.

A MIS ABUELOS, José, Carmen y Lidia, con mucho amor. Agradeciéndoles por siempre su cariño y ayuda.

A MIS HERMANAS Y SOBRINO, Carolina, Gracia y Mario, quienes con su alegría y cariño me han manifestado su apoyo, impulsándome a seguir siempre adelante.

A MIS PRIMOS Y TIOS, agradeciéndoles por su constante interés en mi persona y en el desarrollo de mis estudios.

A MIS PROFESORES, con mucho respeto y admiración.

A MIS COMPANEROS Y AMIGOS, con cariño, porque con su amistad ha sido agradable compartir el estudio y deporte.

Dinorah del Carmen.

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación lo dedico a **Dios Todopoderoso**, por haberme iluminado para iniciarme y concluir mis estudios.

A MIS PADRES, por ayudarme con su esfuerzo en todos los aspectos para terminar los estudios de mi carrera como un resultado de esa difícil tarea que Dios les dió al momento de mi nacimiento.

A MIS ABUELAS, por fortalecerme con sus oraciones ante Dios Todopoderoso.

A MIS HERMANOS, por haberme apoyado y sabido comprender durante el transcurso de mis estudios; pero en especial a mi hermana Lorena Alcira, por haberme orientado y acompañado aún hasta en los momentos más algidos provocados por los estudios de mi carrera.

A MI ASESOR, COORDINADOR Y MAESTROS, que me hicieron posible encontrar el entusiasmo necesario para mi carrera elegida.

A MI NOVIO, por su apoyo, comprensión y amor que me brindó en todo momento.

A LAS SEÑORAS, Silvia Guardado, Sonia de López y Lic. Gilma de Molina, por su apoyo incondicional.

Y a mis amistades que de una u otra forma me alentaron para estudiar con ahinco y así haberseme hecho posible llegar a este momento tan satisfactorio de mi vida.

Rony Griselda

R E S U M E N

Debido a los problemas causados por la presencia de hierro y manganeso en las aguas para uso doméstico e industrial, se requieren métodos de tratamiento de aguas que eliminen ambos metales o que permitan que las concentraciones de éstos en el agua tratada estén dentro de los límites máximos permisibles que establecen las normas de calidad de agua potable.

Los métodos de tratamiento que están siendo utilizados en el país son eficientes aunque no de bajo costo, ya que dependen de insumos importados como productos químicos, repuestos mecánicos, materiales de construcción, etc., y de asesorías técnicas proporcionadas por instituciones especializadas, por lo que es necesario buscar nuevas alternativas de solución que eviten en lo posible la dependencia tecnológica de países desarrollados; creando tecnología apropiada a las condiciones de las aguas de El Salvador, siendo una opción factible la que se presenta en este trabajo de graduación; se estudió la remoción de hierro y manganeso por medio de aireación y retención en un lecho de lava volcánica. La información bibliográfica recopilada en esta investigación explica el por qué de la presencia de hierro y manganeso en las aguas naturales, los problemas

que causan dichos metales, su química y los métodos de re moción más comúnmente utilizados, siendo los dos últimos temas los que proporcionaron las bases para el muestreo y el diseño y construcción de los equipos. El muestreo se efectuó en lugares donde la presencia de ambos elementos era segura, seleccionándose el pozo 34 de Guluchapa, Asi no para la evaluación experimental del sistema de trata mien to de aguas que se construyó, ésta comprende dos etapas:

- 1- La evaluación del proceso de aireación en la que se es tudió la aireación por difusión, encontrándose que el hierro era el mayormente oxidado, los resultados obtenidos con la mejor corrida, expresados como porcentaje de rendimiento de oxidación fueron: 83.62% para el hie rro y 40% para el manganeso.
- 2- Evaluación del proceso de filtración y la capacidad filtrante de la lava volcánica, presentando este trata mien to altos porcentajes de rendimiento en la remoción de ambos metales, siendo éstos 99.2 para hierro y 100 para manganeso, las concentraciones de los dos elementos al final del tratamiento están dentro de los límites máximos permisibles que exige la norma. Sucediendo lo mismo en pruebas con otros tipos de aguas conteniendo hierro y manganeso.

Se hicieron una serie de análisis físico-químicos y bacteriológicos a muestras de agua al inicio y al final

del tratamiento, con el fin de conocer la calidad del agua obtenida, la cual resultó ser excelente ya que cada uno de los componentes analizados se encuentran en cantidades menores a los límites máximos permisibles más rigurosos, establecidos en las normas de los Estados Unidos de América, la Organización Mundial de la Salud y la Comunidad Europea.

El punto de agotamiento de la lava volcánica no fue posible determinarlo, sin embargo mediante balances de materia fueron calculadas las cantidades de hierro y manganeso retenidas por pie cúbico de lava durante toda la experimentación, sin que el lecho filtrante diera muestras de agotarse, los resultados fueron: 152,424 mg de hierro depositado/pie³ de lecho y 179,999.34 mg de manganeso depositado/pie³ de lecho, los cuales son superiores a los reportados para materiales filtrantes comerciales a excepción del Filox.

La última experimentación realizada fue la determinación de la mejor solución de lavado de la piedra ya empleada, la cual resultó ser el agua libre de hierro y manganeso, porque ésta permitió que permaneciera cierta cantidad de óxidos sobre la superficie del lecho que son imprescindibles para el proceso de filtración, además de ser conveniente por su bajo costo y su disponibilidad inmediata.

A partir de los resultados obtenidos durante las corridas en los dos procesos de tratamiento se obtienen tres

modelos matemáticos. Para la etapa experimental del proceso de aireación se obtuvo un modelo matemático que predice el comportamiento del aireador en base a la remoción de hierro, para la filtración se seleccionaron dos modelos matemáticos que predicen el comportamiento del filtro en base a la remoción de hierro y manganeso, respectivamente.

Las tres regresiones pasaron una serie de pruebas estadísticas para evaluar su validez y utilidad estadística.

En esta investigación se concluye que la lava volcánica posee gran capacidad de retención de hierro y manganeso necesitando solamente un tratamiento de preparación y recubrimiento que resulta ser de bajo costo, siendo además un recurso natural abundante con gran potencial de uso.

I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	1
I. FUENTES DE AGUA Y SU CALIDAD.	3
1.1. Fuentes de Abastecimiento de Agua.	3
1.1.1. Abastecimientos Superficiales.	4
1.1.2. Abastecimientos Subterráneos.	4
1.2. Calidad de Agua.	6
1.2.1. Normas de Calidad del Agua.	8
1.2.2. Problemática de Contaminación con Hierro y Manganeso.	9
II. PRESENCIA DE HIERRO Y MANGANESO EN LAS AGUAS NATURALES.	12
2.1. Generalidades.	12
2.2. Presencia de Hierro y Manganeso en las Aguas de El Salvador.	13
2.2.1. Origen.	13
2.2.2. Distribución.	14
III. QUIMICA DEL HIERRO Y MANGANESO EN AGUAS NATU <u>R</u> RALES.	16
3.1. Factores que Influyen en la Solubilidad de los Compuestos de Hierro y Manganeso.	18

	Página
3.1.1. pH.	19
3.1.2. Efecto de Metales Previamente Precipitados.	22
3.1.3. Concentración de Iones Bicarbonato/Carbonato.	22
3.1.4. Actividad Microbiana.	23
3.1.5. Formación de complejos.	25
3.1.6. Cloración.	26
IV. PROCESOS UNITARIOS INVOLUCRADOS EN LA REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO DE LAS AGUAS.	28
4.1. Aireación.	28
4.1.1. Tipos de Aireadores.	29
A. Aireadores Agua en Aire.	29
B. Aireadores Aire en Agua.	30
4.2. Filtración.	33
4.2.1. Tipos de Filtros.	34
A. Filtros a Gravedad.	34
B. Filtros a Presión.	34
C. Filtros de Oxidación.	35
V. PLANTAS DE REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO.	38
5.1. Deferrización de Agua Subterránea.	38
5.2. Desmanganización de Agua Subterránea.	44
5.3. Métodos Combinados de Remoción de Hierro y Manganeso.	45

	Página
5.4. Plantas de Tratamiento Utilizadas en El Salvador.	49
VI. SELECCION DEL LUGAR DE TRABAJO.	57
6.1 Lugares de Muestreo.	57
6.2 Técnicas de Muestreo.	59
6.2.1. Recipientes de Muestreo.	59
6.2.2. Tamaño de Muestra.	60
6.2.3. Procedimientos de Recolección.	60
6.2.4. Pretratamiento de las Muestras.	61
6.2.5. Identificación y Transporte de la Muestra.	62
6.3. Análisis de las Muestras de Agua.	62
6.3.1. Tipos de Análisis a Realizar.	63
A. Análisis Primarios.	64
A.1. Análisis de Hierro.	64
A.1.1. Método de la Ortofenantrolina para Análisis de hierro.	65
A.1.2. Resultados Obtenidos en el Análisis de Hierro.	66
A.2 Análisis de Manganeso.	66
A.2.1. Método del Peryodato para Análisis de Manganeso.	68

6.3.2. Resumen de los Resultados Obtenidos en los Análisis Realizados.	79
VII. DISEÑO EXPERIMENTAL DE ANALISIS POR REGRESION.	80
7.1. Descripción de las Variables de Diseño.	81
7.1.1. Diagrama del Sistema en Estudio.	81
7.1.2. Variables Independientes.	84
A. En el Aireador.	84
B. En el Filtro.	86
7.1.3. Variables Fijas.	88
A. En el Aireador.	88
B. En el Filtro.	91
7.1.4. Variable Respuesta.	95
A. En el Aireador.	95
B. En el Filtro.	96
7.2. Selección de los Niveles de las Variables Independientes.	97
7.2.1. Justificación de los Niveles Escogidos.	97
A. En el Aireador.	97
B. En el Filtro.	100
7.3. Establecimiento del Orden y Tratamiento. de las Unidades Experimentales.	103
7.4. Tratamiento Estadístico de los Datos del Diseño Experimental.	105

7.4.1. Procedimiento de Pruebas Estadísticas.	105
A. Establecimiento de una Posible Regresión entre las Variables Independientes (X_1 , X_2 , X_3 y X_4) y la Variable Respuesta (Y).	105
B. Cálculo de los Valores Y_c y de las Desviaciones a partir de la Regresión Anterior y de los Valores Experimentales de Y, X_1 , X_2 , X_3 y X_4 , obtenidos y aplicados en la investigación.	108
C. Evaluación de la Correlación de los Datos Experimentales de Regresión.	108
D. Evaluación de la Significancia Estadística de la Correlación.	110
E. Evaluación de la Significancia Estadística de la Regresión por Análisis de Varianza Utilizando la Prueba de F y el Nivel de significancia mínimo.	111
F. Evaluación de la Capacidad de Predicción de la Regresión.	113

	Página
7.4.2. Uso de Computadora.	114
7.4.3. Ejemplo de Aplicación del Procedi- miento de Pruebas Estadísticas.	114
VIII. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA.	121
8.1. Descripción del Aireador.	122
8.1.1. Partes Básicas.	122
8.2. Descripción del Filtro.	132
8.2.1. Partes Básicas.	132
8.3. Representación Gráfica del Sistema Construído.	147
8.4. Operación y Mantenimiento.	147
8.4.1. Proceso de Aireación.	149
8.4.2. Proceso de Filtración.	149
A. Control de Flujo.	151
B. Control de Pérdida de Carga.	152
C. Necesidad de Retrolavado.	153
8.5. Especificaciones del Trabajo Experimental.	153
A. Etapa Experimental de Aireación.	154
B. Etapa Experimental de Aireación y Filtración.	155
IX. DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL	158
9.1. Etapa de Familiarización.	159
9.2. Etapa Experimental.	159
9.2.1. Descripción de la parte experimen- tal en Guluchapa.	159

	Página
A. Condiciones Generales.	159
B. Procedimiento Seguido en la Etapa Experimental.	162
9.3. Resultados Obtenidos en la Etapa Experimental.	164
9.3.1. Proceso de Aireación.	164
9.3.2. Resultados Obtenidos en el Proceso de Filtración.	167
9.3.3. Pruebas Experimentales con Otros Tipos de Agua.	173
9.3.4. Evaluación de la Calidad del Agua Obtenida.	174
9.3.5. Evaluación de la Capacidad de Retención de hierro y manganeso del lecho filtrante.	174
9.3.6. Pruebas de Regeneración del Lecho Filtrante.	178
9.4. Evaluación Estadística de los Resulta- dos Obtenidos Experimentalmente.	180
9.4.1. Evaluación Estadística de la Regresión.	181
A. Establecimiento de la Regre- sión entre las variables in- dependientes y las variables respuesta.	181

B. Cálculo de los Valores del Porcentaje de Rendimiento en la Remoción de Metal (Y_c) y de las Desviaciones (D) por Medio de la Regresión Anterior y de los Valores Experimentales de las variables involucradas (X_1 , X_2 , X_3 y X_4).	183
C. Cálculo de la Correlación de los Datos Experimentales y de Regresión.	183
D. Evaluación de la Significancia Estadística de la Correlación.	185
E. Evaluación Estadística de las Regresiones.	187
E.1. Análisis de Varianza.	187
E.2. Nivel de Significancia Mínimo (P).	188
F. Evaluación de la Capacidad de Predicción de la Regresión.	189
X. EVALUACION ECONOMICA	191
10.1. Inversión Fija de Capital.	191
10.2. Costos de Producción.	193
10.2.1. Costo de Hipoclorito de Calcio.	197
10.2.2. Costo de Energía Eléctrica.	198

	Página
XI. DISCUSION DE RESULTADOS.	200
11.1. Muestreo.	200
11.2. Selección del Lugar de Trabajo.	202
11.3. Experimentación.	203
11.3.1. Procesos de Aireación.	203
11.3.2. Proceso de Filtración.	206
11.3.3. Diferentes Tipos de Agua.	209
11.4. Evaluación de la Calidad del Agua.	213
11.5. Capacidad de Retención de la Lava.	220
11.6. Regeneración del Lecho Filtrante.	222
11.7. Evaluación Estadística.	223
11.7.1. Repetibilidad de Resultados.	223
A. Proceso de Aireación.	223
B. Proceso de Filtración.	224
11.7.2. Regresión.	
A. Establecimiento de la Re-	
gresión entre las Variables	
Independientes y las Varia-	
bles Respuesta.	225
11.8. Evaluación Económica.	226
XII. MANUAL DE OPERACION.	228
XIII. UTILIZACION DE LOS DESECHOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO.	233

	Página
13.1. Posibles usos Industriales de los Oxidos Presentes en las Aguas de Lavado y Retro lavado.	233
13.1.1. Usos del Oxido de Hierro.	233
13.1.2. Usos del Oxido de Manganeso.	235
CONCLUSIONES.	237
RECOMENDACIONES.	241
REFERENCIAS.	246
ANEXOS	255
Anexo A- Determinación Analítica en las Muestras de Agua.	256
Anexo B- Pruebas Experimentales:	
1) Prueba de Sedimentación	
2) Determinación de la Demanda de Cloro	271
Anexo C- Determinación de las Especificaciones de Trabajo Experimental del Filtro y de la Bomba que lo Alimenta.	274
Anexo D- Tablas Estadísticas Utilizadas.	281
Anexo E- Preparación de la Piedra Volcánica.	283
Anexo F- Determinación de los Costos de Producción.	298
Anexo G- Pruebas Experimentales Realizadas a la Piedra Volcánica:	
1) El espacio intersticial libre, disponible entre los poros del lecho filtrante.	

te de tamaño efectivo, 0.6 mm y Coeficiente de Uniformidad de 1.4.

2) El Regenerante más Conveniente.

309

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.1	Límites recomendables para hierro y manganeso en aguas para diferentes usos.	10
1.2	Problemas causados por la presencia de hierro y manganeso en aguas para diferentes usos.	11
3.1	Solubilidad de algunos compuestos de hierro.	23
4.1	Capacidad de remoción de hierro y manganeso de algunos filtros comerciales.	37
5.1	Plantas de Potabilización de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA).	55
5.2	Eficiencia global de remoción de hierro y manganeso en plantas potabilizadoras de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA).	56
6.1	Concentración de hierro y manganeso en aguas de diferentes lugares reportados por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA).	58
6.2	Lugares seleccionados para el muestreo de agua.	59

Tabla		Página
6.3	Resultados obtenidos en el análisis de hierro de los diferentes lugares de <u>mues</u> treo.	67
6.4	Resultados obtenidos en el análisis de manganeso para los diferentes lugares muestreados.	70
6.5	Indice del número más probable de bacterias coliformes.	72
6.6	Resultados de las pruebas bacteriológicas al inocular 10 ml de agua de los pozos <u>a</u> nalizados.	74
6.7	Resumen de los análisis primarios y secundarios de los diferentes lugares muestreados.	79
7.1.	Clasificación y subclasificación de las variables influyentes en el sistema de remoción de hierro y manganeso.	83
7.2	Rangos de pH ideales para la oxidación de compuestos ferrosos y manganosos.	92
7.3	Tipo y niveles de las variables independientes para el aireador.	97

Tabla	Página
7.4 Tipo y niveles de las variables independientes para el filtro.	101
7.5 Rangos de tamaños efectivos para la eliminación por filtración de hierro, manganeso y ácido sulfhídrico con filtros comerciales	101
7.6 Especificaciones de altura de lechos filtrantes para filtros rápidos.	102
7.7 Cuadro de trabajo que establece el orden, realización y las repeticiones de las corridas experimentales para las dos etapas experimentales (aireación y filtración).	104
7.8 Interacciones posibles cuando se relacionan cuatro variables independientes.	107
7.9 Valores de variable respuesta experimental (Y) e independientes (X_1 y X_2) para muestra de trece observaciones.	115
7.10. Valores de variables respuesta experimental (Y) y de regresión (Y_c) y de las desviaciones (D) para cada una de las observaciones	116
7.11 Coeficiente de correlación (r) de tabla para once grados de libertad y niveles de significancia de 5% y 1%.	117
7.12. Valores de distribución de Fisher de tabla (F crítico) a niveles de significancia de 5% y 1% para 2 y 10 grados de libertad.	119

Tabla		Página
8.1	Coeficientes de uniformidad recomendados para diferentes tipos de filtros.	136
8.2	Tiempos de residencia totales del agua en el sistema.	157
9.1	Descripción de la división de las corridas experimentales del proceso de filtración, hecha en base a las variables: diámetro de partícula, altura de lecho filtrante y clo <u>ración</u> .	162
9.2	Resultados expresados como porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro y manganeso, obtenidos durante el proceso de aireación utilizado para la oxidación de ambos metales solubles en las muestras de agua.	165
9.3	Condiciones de trabajo de la corrida 5, <u>uti</u> lizada para la verificación de resultados en el proceso de aireación, útil para la oxidación del hierro y manganeso solubles en las muestras de agua.	167
9.4	Resultados expresados como porcentaje de <u>ren</u> dimiento en la remoción de hierro y manganeso, durante la etapa de verificación del <u>pro</u>	

Tabla	Página
	.168
9.5	168
9.6	169
9.7	171
9.8	171

Tabla		Página
9.9	Concentraciones de hierro y manganeso totales promedio a la entrada y salida del filtro y la de metal removido durante el proceso de filtración con la corrida 3.	171
9.10	Resultados promedios obtenidos durante las pruebas de verificación con agua de los pozos Cuaya 6 y 34 de Guluchapa y de la Colonia San Felipe en San Bartolo.	172
9.11	Comparación entre la calidad del agua cruda y del agua tratada proveniente del sistema de tratamiento construido, el porcentaje de aumento o disminución de cada una de las especies analizadas y límites establecidos por las normas de calidad.	175
9.12	Volumen de agua tratada y cantidad de hierro y manganeso depositada sobre el lecho filtrante en cada una de las etapas experimentales y la cantidad de metal depositado en un pie cúbico de lecho filtrante en los rangos de diámetro de partículas (0.6-1.18 mm) y alturas de lecho filtrante (0.4-0.8 mm) utilizados en esta investigación.	177

Tabla	Página
9.13 Características de la piedra recubierta con óxido y después de cada uno de los lavados con las diferentes soluciones utilizadas.	179
9.14 Valores de los porcentajes de rendimiento en la remoción de hierro y manganeso experimentales y de regresión y de las desviaciones en cada una de las corridas de las dos etapas de tratamiento de aguas utilizadas en esta investigación.	184
9.15 Coeficiente de correlación y de determinación entre los valores experimentales (Y) y los valores de regresión (Yc) de las dos etapas de tratamiento de aguas utilizadas en esta investigación.	185
9.16 Grados de libertad para cada una de las 3 regresiones seleccionadas en esta investigación.	186
9.17 Valores de coeficientes de correlación de tabla para 7 y 8 grados de libertad a niveles de significancia del 5% y 1%.	186
9.18 Valores de distribución de Fisher calculados a partir de los valores experimentales	

Tabla	Página
(Y) y de regresión (Yc) para cada uno de los tres grupos de resultados y los valores de tabla a niveles de significancia del 5% y 1% para cada una de las regresiones.	187
9.19 Valores de nivel de significancia mínimo (P) calculados a partir de las regresiones entre nivel de significancia y la distribución de Fisher (F) en cada una de las etapas del tratamiento de agua utilizado en la investigación.	189
9.20 Valores de las sumatorias de las desviaciones para cada uno de los tres grupos de resultados obtenidos en la investigación.	190
10.1 Costo por material de construcción.	
10.2 Costo de preparación de 50 Kg.de piedra volcánica.	195
10.3 Gastos de construcción e instalación y puesta en marcha.	196
10.4 Costo del equipo empleado en la investigación	196
10.5 Inversión fija de capital del sistema construido.	197
10.6 Determinación de la energía eléctrica total	

Tabla	Página
consumida por el sistema para la producción de 1.06 m ³ de agua.	198
10.7 Costo de producción total por m ³ de agua.	199
11.1 Mejores resultados obtenidos en el proceso de aireación.	204
11.2 Resultados obtenidos en las pruebas experimentales del sistema construido con otros tipos de agua.	211
11.3 Capacidades de retención de diferentes medios filtrantes.	221
A.1 Volúmenes de solución madre necesarios para la preparación de soluciones patrón de hierro.	258
A.2 Valores de absorbancia para los patrones de hierro total y hierro soluble.	261
A.3 Valores de absorbancia para patrones de hierro <u>acomplejado</u> .	262
A.4 Volúmenes de solución madre necesario para la preparación de soluciones patrón de manganeso.	265
A.5 Valores de absorbancia para patrones de manganeso.	267

Tabla	Página
B.1 Determinación del hipoclorito de calcio requerido por galón de agua.	272
D.1 Coeficientes de correlación (r) para determinados grados de libertad y niveles de significancia.	281
D.2 Valores de F crítico para determinados grados de libertad del error y niveles de significancia.	282
E.1 Determinación de los gramos de lava por tamiz requeridos para formar una muestra de 100 gramos de lecho filtrante con tamaño efectivo de 0.6 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4.	290
E.2 Gramos de lava por tamiz que forman el lecho filtrante de tamaño efectivo, 0.6 mm y coeficiente de uniformidad 1.4.	294
E.3 Resultados obtenidos en la preparación del lecho filtrante de tamaño efectivo 1.18 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4.	297
F.1 Especificaciones de trabajo utilizados para producir 1.06 m ³ de agua.	299
F.2 Tiempo requerido para realizar una corrida.	300

Tabla	Página
F.3 Distribución del tiempo de trabajo del sistema para producir 1.06 m ³ de agua.	301
F.4 Tiempo de trabajo del compresor para la producción de 1.06 m ³ de agua.	305
F.5 Tiempo de trabajo de la bomba 1 para la producción de 1.06 m ³ de agua.	306

INDICE DE FIGURAS

Figuras	Página
3.1. Oxidación de iones ferrosos en función del pH.	20
3.2. Oxidación de iones manganosos en función del pH.	20
3.3. Zonas de pH favorables para la remoción de iones férricos y mangánicos.	21
4.1. Esquema del modelo de aireador por difusión utilizado en la oxidación de compuestos ferrosos y manganosos.	32
5.1. Esquema de la caída en forma de lluvia para la deferrización del agua.	41
5.2. Esquema de la caída por irrigación para la deferrización del agua.	42
5.3. Instalación de deferrización cerrada (sistema BREDA).	43
5.4. Desmanganización del agua a través del método de la permutita.	46
5.5. Remoción de hierro y manganeso por medio de aireación y suavización con cal.	50
5.6. Remoción de hierro y manganeso a través de cloración, aireación, filtración por contacto y filtración convencional.	51
5.7. Remoción de hierro y manganeso por medio de aireación y filtración en lecho múltiple.	52
5.8. Remoción de hierro y manganeso a través del sistema Greensand.	53

Figuras	Página
7.1 Diagrama de flujo del sistema en estudio para la remoción de hierro y manganeso.	84
7.2 Prueba de sedimentación del hierro soluble	100
8.1 Difusores de aire desmontables del sistema de aireación utilizado para la oxidación de hierro y manganeso.	124
8.2 Vista del difusor en el tanque de aireación utilizado para la oxidación de hierro y manganeso.	125
8.3 Vista en planta y en elevación del distribuidor de aire empleado en la oxidación de hierro y manganeso.	126
8.4 Ubicación del manómetro en el distribuidor de aire del sistema de aireación empleado para la oxidación de hierro y manganeso.	127
8.5 Vista frontal en elevación del sistema de aireación construido para la oxidación de hierro y manganeso.	130
8.6 Sistema de aireación construido para la oxidación de hierro y manganeso.	131
8.7 Sección desmontable superior del filtro empleado para la remoción de hierro y manganeso.	133

Figuras	Página
8.8 Vista del cierre hermético, bridas y tapadera superior del filtro utilizado para la remoción de hierro y manganeso.	134
8.9 Corte longitudinal del filtro utilizado para la remoción de hierro y manganeso que muestra su estructura interna.	135
8.10 Material filtrante (lava volcánica triturada).	137
8.11 Corte longitudinal del filtro que muestra el sistema de drenaje.	139
8.12 Vista de la ubicación de las válvulas de globo en el filtro, utilizado para la remoción de hierro y manganeso.	140
8.13 Vista del manómetro ubicado a la entrada del filtro retenedor de hierro y manganeso.	143
8.14 Vista del manómetro ubicado a la salida del filtro retenedor de hierro y manganeso.	144
8.15 Vista de la ubicación de las válvulas de bola y de compuerta en el sistema de tuberías inferior del filtro, empleado para la remoción de hierro y manganeso.	145
A.1 Curva de calibración para hierro total-hierro soluble.	261

Figura		Página
A.2	Curva de calibración para hierro acomple- jado	262
A.3	Curva de calibración para manganeso total manganeso soluble	267
E.1	Algoritmo para la preparación del lecho filtrante (Piedra volcánica)	284
E.2	Curva granulométrica diseñada para el lecho filtrante, con tamaño efectivo de 0.6 mm y coeficiente de uniformidad 1.4	287
E.3	Curva granulométrica diseñada para el lecho filtrante con tamaño efectivo de 1.18 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4	296

INTRODUCCION

En El Salvador las fuentes de abastecimiento de agua destinadas a los diferentes usos son generalmente de origen subterráneo, por lo que durante su recorrido al entrar en contacto con el suelo, que en su mayoría es de origen volcánico, adquieren muchos contaminantes de origen mineral, entre los cuales el hierro y el manganeso se hallan presentes en diferentes concentraciones. Si estas son bajas no causan inconvenientes serios, en el caso contrario llegan a ocasionar en el uso doméstico manchas tenaces en ropa, alimentos, utensilios y muebles sanitarios; en la industria causan depósitos en sistemas de distribución, incrustaciones en sistemas de alta transferencia de calor, reaccionan con tintes y otros productos químicos empleados en la industria textil y del papel, promueven crecimientos microbiológicos en torres de enfriamiento y afectan la calidad estética de productos alimenticios y bebidas en general. Por esta razón durante el transcurso del tiempo han sido muchos los tratamientos utilizados en la remoción de ambos metales. Actualmente los métodos más efectivos implican altos costos de inversión, por lo que es necesario buscar alternativas económicas y técnicamente viables para solucionar este problema. En el sistema de tratamiento objeto de esta investigación, lo que se preten

de es introducir modificaciones en los métodos convencionales, mediante la evaluación de las propiedades de la lava volcánica como medio filtrante promotor de reacciones autocatalíticas, considerándola como un posible material sustitutivo de las zeolitas artificiales, ya que posee las ventajas de ser un recurso natural abundante, de bajo costo, con amplio potencial de explotación.

La serie de conocimientos obtenidos durante las etapas que conlleva este proyecto permiten hacer algunas consideraciones prácticas con el fin de solventar el problema en cuestión o por lo menos dar la pauta para que posteriores investigaciones completen la información generada, ya que es un reto para todo profesional encontrar vías alternas al alcance de los recursos humanos, materiales y técnicos con los que cuenta el país.

I. FUENTES DE AGUA Y SU CALIDAD

El agua es el recurso natural más importante del mundo por el hecho de estar íntimamente relacionado con el desarrollo del hombre; es de vital importancia en todas las actividades cotidianas, sin ella no podría existir la vida y la industria no funcionaría. Además, en muchas aplicaciones no puede ser sustituida por ningún otro tipo de compuesto (1).

Sin embargo, el agua químicamente pura es un líquido muy escaso y difícil de obtener, frecuentemente se contamina con diversas sustancias. En el ciclo hidrológico el agua al entrar en contacto con gases de la atmósfera y con los minerales de la corteza terrestre actúa como disolvente, originando reacciones químicas que modifican su composición (2).

1.1 FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Se comprende por fuente de abastecimiento a aquel punto o fase del ciclo hidrológico del cual se puede obtener el agua, para ser utilizada en las diferentes formas (3).

En general, sólo hay dos fuentes de agua a disposición del hombre: los abastecimientos superficiales y los abas-

tecimientos subterráneos.

1.1.1 Abastecimientos Superficiales

Son todos los depósitos que se hallan sobre la superficie terrestre, cuya obtención de agua puede hacerse directamente (3).

Se incluyen en esta clasificación los océanos, ríos, lagos, áreas de drenaje que envían el agua hacia los embalses y los procedimientos que permiten captar y retener el agua lluvia. Dichas aguas contienen muchas impurezas, tanto químicas como biológicas debido a la permanente descarga de desechos industriales, lo que implica mayores tratamientos de purificación (3,4).

1.1.2 Abastecimientos Subterráneos

Puesto que las aguas de superficie son visibles y se han gastado grandes sumas en su aprovechamiento, es natural pensar que esta manifestación de agua constituye la mayor fuente de satisfacción de las necesidades de agua dulce. Sin embargo gran parte del agua aprovechable para consumo humano se encuentra en el subsuelo (1).

No toda el agua que se halla bajo la superficie de la tierra puede extraerse de las formaciones que lo contienen, cierta cantidad se encuentra en estratos tan profundos que sólo los costos de bombeo invalidarían su extracción.

A pesar de este hecho, las reservas subterráneas (manantiales, pozos y galerías horizontales) presentan muchas ventajas. Las aguas superficiales al filtrarse a través de los canales y porosidades de la zona geológica donde se encuentran, quedan libres de sedimentos y organismos causantes de enfermedades, además las cantidades almacenadas exceden vastamente a aquellos contenidos en los cuerpos naturales y artificiales de la superficie. Por otra parte, se encuentran presentes en el lugar donde son requeridas, no necesiándose costosos medios de transporte (4).

El agua subterránea, es entonces, una importante fuente de suministro en el mundo, y su uso se incrementa constantemente. En El Salvador tanto para las áreas urbanas como para las rurales, han sido explotadas preferentemente las fuentes de agua subterránea para el abastecimiento, por lo que en la mayoría de los casos la potabilización se limita a la desinfección y en muchos otros a la remoción de hierro y manganeso (5).

El mayor número de captaciones se obtienen a través de pozos profundos desde los cuales el agua es bombeada, algunos otros son de agua de manantiales (nacimientos) conducida por gravedad al sistema de distribución y muy pocas son de aguas superficiales, como puede observarse en la tabla 5.1 (pág. 56). Por esta razón el trabajo se limita al estudio del abastecimiento de agua proveniente de pozos profundos.

El agua subterránea durante su paso a través del suelo se combina con muchas sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas adquiriendo componentes minerales determinados por la naturaleza de la superficie de captación y por las formaciones geológicas atravesadas por el agua (4). En el país se caracterizan por ser limpias y sin color, pero contienen frecuentemente hierro y manganeso. Cuando entran en contacto con el aire, al salir de la tierra, se enturbian y tiñen por formación de óxidos de ambos minerales. Es usual también encontrar altos contenidos de calcio, magnesio y sílice. En general poseen durezas moderadas pero altas alcalinidades.

Se observa que el contenido de anhídrido carbónico disminuye a medida que el nivel freático se profundiza, posiblemente como consecuencia del decremento de la actividad bacteriana. Por otro lado, la temperatura a profundidades menores de 30 m es aproximadamente la del ambiente, para profundidades mayores se incrementa 1°C por cada metro (4).

1.2 CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua está definida por todos los elementos que pueden afectar su aceptabilidad por parte del consumidor o que se consideran potencialmente peligrosos para la salud.

Los componentes que definen las características del agua se clasifican en los siguientes grupos (6):

a) Componentes biológicos-microbiológicos

Se consideran en esta clasificación a todos los organismos y microorganismos productores de enfermedades (protozoos, helmintos, hongos, bacterias y virus).

b) Componentes físicoquímicos

Estos se clasifican en tóxicos y en aquellos que afectan la aceptabilidad del agua. Son de particular interés las sustancias que poseen propiedades venenosas acumulativas, que pueden ser orgánicas o inorgánicas (arsénico, cianuro, cromo, plomo, mercurio, aldrin, DDT, benceno, cloroformo, etc.). Las sustancias que afectan la aceptabilidad del agua o integrantes estéticos, son aquellos que alteran el color, olor y sabor. Aunque no dañan directamente la salud, son causantes del rechazo de la fuente y pueden inducir al consumidor a utilizar fuentes inseguras de mejor apariencia. Algunos de ellos son la turbidez, temperatura, pH, dureza, siendo especialmente problemáticas las aguas con altos contenidos de hierro y manganeso por afectar apreciablemente el color y sabor de la misma.

c) Componentes radioactivos

Por lo general son de origen natural y se detectan en aguas subterráneas en zonas de mineralización. Los

principales son radionúcleos de emisión de actividad tipo alfa y tipo beta (Ra_{226} , Ra_{228} , U_{234} y U_{238}).

1.2.1 Normas de Calidad del Agua

Las normas de calidad son dictadas de acuerdo con el uso final que se le da al agua. En términos generales son dos fines principales: el uso doméstico y el industrial.

Respecto al agua para consumo humano, las normas de potabilidad están constituidas por las metas de calidad que cada país se impone de acuerdo con las condiciones ambientales, sociales, económicas y culturales existentes (6).

Existen guías de calidad elaboradas por organismos internacionales para ser utilizadas por los países como base para el desarrollo de sus propias normas (7).

En lo referente a la calidad requerida por la industria, es necesario puntualizar que las exigencias son enormemente variables de una industria a otra, por lo que es imposible establecer normas generales; lo recomendable es que cada industria realice los tratamientos correctivos, de acuerdo con el uso específico (6).

Siendo el hierro y el manganeso el objeto de estudio se vuelve necesario conocer los límites máximos recomendables en el agua para diferentes usos, los cuales se presentan en la tabla 1.1.

1.2.2 Problemática de Contaminación con Hierro y Manganeso

Dévido a que no hay efectos perjudiciales a la salud cuando se consume agua que contiene Fe y Mn, la Organización Mundial de la Salud (OMS), no considera ningún riesgo en la ingestión de estos minerales en las cantidades normalmente encontradas en las aguas (8,9).

Las concentraciones límites admisibles de calidad de agua para el Fe y Mn en aguas de suministro están basadas en problemas estéticos y organolépticos y no en problemas concernientes de salud (8,9).

La tabla 1.2 resume los principales efectos originados por la presencia de hierro y manganeso en aguas para diferentes usos.

TABLA 1.1

LIMITES RECOMENDABLES PARA HIERRO, MANGANESO
Y (HIERRO + MANGANESO) EN AGUAS PARA DIFERENTES USOS (10).

E m p l e o	Concentraciones (ppm)		
	Fe	Mn	Fe + Mn
Textiles	0.1-1.0	0.05-1.0	0.2-1.0
Curtido	0.1-0.2	0.1 -0.2	0.2
Industria azucarera	0.1		0.1
Producción de fibras de rayón y pulpas	0.05	0.03	0.05
Papel y pulpas finos	0.1	0.05	-
Papel, pasta de madera	0.3	0.1	0.3
Papel kraft blanqueado	0.2	0.1	0.2
Papel kraft sin blanquear	1.0	0.5	-
Lavandería	0.2-1.0	0.2	0.2-1.0
Tintes			0.25
Fabricación de hielo	0.2	0.2	0.2
Proceso de alimentos en general	0.2	0.2	0.2-0.3
Industrias lácteas	0.1-0.3	0.03-0.1	-
Bebidas carbonatadas	0.1-0.2	0.2	0.1-0.4
Cervecería y licores	0.1	0.1	0.1
Panadería	0.2	0.2	0.2
Aire acondicionado	0.5	0.5	0.5
Uso doméstico *	0.3	0.1	0.3

* Actualmente las normas de los Estados Unidos consideran los niveles máximos permisibles de 0.3 mg/L y 0.05 mg/L para hierro y manganeso respectivamente, en agua para consumo humano.

TABLA 1.2

PROBLEMAS CAUSADOS POR LA PRESENCIA DE HIERRO Y MANGANESO
EN AGUAS PARA DIFERENTES USOS

	EMPL E O	E F E C T O
Concentraciones superiores a 0.3 ppm de hierro total.	Uso doméstico	Produce "agua roja", manchas amarillo-rojizas en todo objeto que entre en contacto con ella (10, 11).
Concentraciones iguales o superiores a 1 ppm de hierro total.	Uso doméstico	Sabor metálico o medicinal y turbidez (10,11).
Concentraciones de 0.05 de manganeso total	Uso doméstico	No colorea el agua, pero produce manchas negras muy tenaces en ropa, muebles, sanitarios, lavaderos y otros (7,10).
Concentraciones de 0.5 ppm o mayores de manganeso total	Uso doméstico	Imparte al agua un sabor metálico (8).
Hierro y manganeso en concentraciones moderadas	Usos diversos	Agua de aspecto sucio o "roja", manchas de color café-negro, se favorece el desarrollo de "bacterias del hierro" causantes de olores y sabores desagradables, depósitos en tuberías, válvulas, obstrucción y fallas en bombas (8,11).
Hierro y manganeso en concentraciones altas	Diveros usos Industriales	Depósitos o incrustaciones, obstrucción de cañerías, pérdidas por fricción, taponamiento de medidores que originan grandes desembolsos por la necesidad de cambiar parte o todo el sistema de distribución (12).
Presencia de hierro y manganeso.	Sistemas de generación de vapor a alta presión	Aceleración de las tendencias corrosivas (13).
Presencia de hierro férrico	Superficies de alta transferencia de calor	Formación de complejos con los silicatos de sodio, originando un depósito fuertemente adherente muy duro llamado Acmita.
Presencia de hierro ferroso o férrico, disuelto o suspendido	Suavización del agua por intercambio iónico.	Obstrucción de los espacios de las resinas.
Oxidos de hierro y manganeso.	Manufactura de papel.	Manchas rojizas
Sales de hierro	Industria textil.	En fregado y blanqueado imparten un tinte amarillo o causan decoloración. Catalizan la descomposición de los agentes blanqueadores causando un ataque activo que degrada el algodón (14).
Hierro y manganeso	Lavandería y tintorería.	El hierro modifica el color, se combina con algunos tintes y causa opacamiento. Tanto el Fe como el Mn manchan los tejidos y decoloran las telas (14).

II. PRESENCIA DE HIERRO Y MANGANESO EN LAS AGUAS NATURALES

2.1 GENERALIDADES

La presencia de hierro y manganeso en las aguas naturales es atribuida a la disolución de rocas y minerales, en presencia de agentes reductores y agentes que acidifican el agua lluvia: dióxido de carbono, ácido húmico, dióxido de azufre, NO_x (se refiere a cualquiera de los óxidos nitrogenados) y en ausencia de oxígeno disuelto. Los sulfatos de ambos elementos están presentes a causa de la acción bacterial sobre los sulfuros; ciertas aguas contienen hierro y manganeso solubles procedentes de la combinación de esos minerales con el ácido húmico (2).

Las concentraciones más altas de hierro y manganeso se encuentran en:

- a- Pozos profundos que atraviesan arenizas, pizarras, esquistos y otras rocas (8).
- b- Pozos profundos que se abren en tierras aluviales (8).
- c- En el fondo de embalses profundos construídos sobre suelos y rocas que contengan hierro y manganeso (2) y capas inferiores de lagos profundos (10).

La descomposición de materia orgánica da por resultado la eliminación de oxígeno disuelto y formación de dióxido

do de carbono, de modo que los compuestos de hierro y manganeso en las tierras y rocas inundadas se convierten en bicarbonatos solubles (11).

Generalmente son tres las formas en que estos dos metales se hallan en los diversos tipos de agua (15):

- a- Bicarbonatos y carbonatos ferroso y manganoso en aguas de pozos con altas cantidades de CO_2 libre presente.
- b- Sulfatos ferroso y manganoso en ríos que contienen ácidos y desechos de aguas minerales, y por la acción bacteriana.
- c- En combinación con materia orgánica, formando compuestos complejos.

2.2 PRESENCIA DE HIERRO Y MANGANESO EN LAS AGUAS DE EL SALVADOR

2.2.1 Origen

En El Salvador el hierro se origina con frecuencia por:

- a) La circulación del agua subterránea sobre la formación de suelos lateríticos, los cuales son suelos rojos con alto contenido de óxido férrico (Fe_2O_3) que pueden constituir minas de hierro. También el óxido ferroso cambia a la forma férrica y puede permanecer en el suelo como óxido férrico hidratado (4,8).

b) La presencia de Biotita y Augita, que son minerales ferromagnésicos muy comunes en las lavas andesíticas y a la presencia del Olivino (silicato de hierro y magnesio) en el caso de lavas basálticas (4,8).

El manganeso acompaña al hierro y se comporta de manera similar a éste, generalmente se le encuentra en rocas y minerales en forma de óxidos y carbonatos (15).

2.2.2 Distribución

En 1975 se realizó en el país un estudio sobre los problemas de remoción de hierro y manganeso, determinándose la distribución de estos minerales mediante análisis físicoquímicos de abastecimientos en todo el país, llegando a la conclusión de que éstos se encuentran distribuidos de la siguiente forma (16):

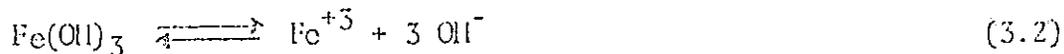
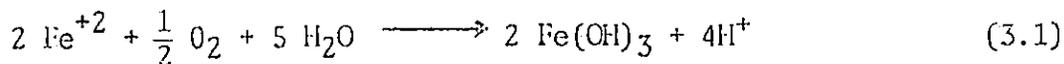
- En forma de sulfuros y carbonatos influenciados por yacimientos de hierro, localizados en el área de Metepán y La Palma.
- Bajo la forma de óxidos en las áreas de San José, San Antonio Los Ranchos y San Isidro Labrador, todos en el departamento de Chalatenango; así mismo se localizan en forma de óxidos en la región norte de los departamentos de Ahuachapán, Cabañas, Morazán y La Unión (Santa Rosa de Lima).
- También se determinó que en la región comprendida por Apulo, Soyapango, San Miguel Tepezontes, Santiago Te-

III. QUIMICA DEL HIERRO Y MANGANESO DE LAS AGUAS NATURALES

El agua que percola a través de rocas, arenas y gravas puede impregnarse con Fe y Mn, usualmente en forma de sales ferrosas y manganosas (10). Las reacciones características de estos metales son típicamente del tipo redox. La oxidación-reducción de ambos metales en el suelo y en las aguas subterráneas determina su contenido en éstas. Tales reacciones desempeñan una función importante en muchos de los fenómenos que se producen en las aguas naturales y en procesos de tratamiento de aguas (2).

La oxidación de los iones ferrosos a férricos por medio de oxígeno disuelto es termodinámicamente favorable (valor negativo de la energía libre de Gibbs) (2).

La reacción total es la que se representa en las ecuaciones 3.1 y 3.2.



$$K_{s, \text{Fe}(\text{OH})_3} = .10^{-38}$$

$$\Delta G^\circ = -78.87 \text{ kJ/mol}$$

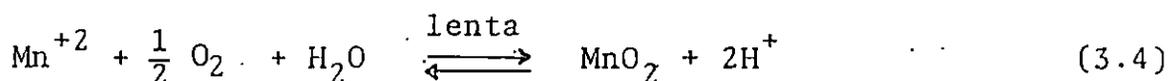
La cinética de esta reacción se representa por la

xacuangos, Santo Tomás, Olocuilta y San Martín, los altos índices de hierro y manganeso son debidos a minerales ferromagnésicos. Frecuentemente los pozos de abastecimiento de aguas cercanas a zonas volcánicas de edad reciente contienen índices anormalmente altos de hierro y manganeso.

ecuación 3.3.

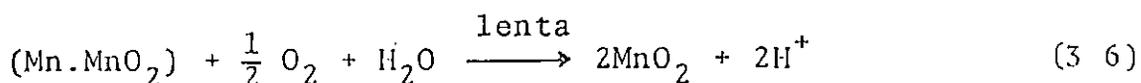
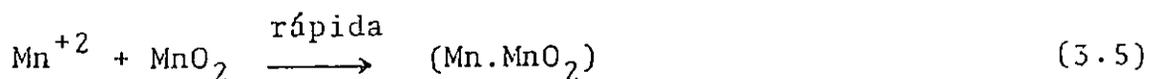
$$-\frac{d(\text{Fe}^{+2})}{dt} = K_1 (\text{Fe}^{+2})(\text{O}_2)(\text{OH}^-)^2 \quad (3.3)$$

La reacción de oxidación del manganeso no es tan rápida como la equivalente con iones ferrosos y el curso de la reacción es diferente, requiere altos valores de pH para obtener velocidades de reacción significativas (15). La reacción completa se representa por la ecuación 3.4.



Es más compleja por su naturaleza autocatalítica, la velocidad de la reacción de oxidación de los iones manganesos aumenta hasta un valor máximo a medida que se forma el producto MnO_2 (15).

La reacción entre iones manganesos y oxígeno disuelto para formar el óxido mangánico insoluble es lenta y limita la velocidad inicial de la reacción (15). Una vez que el óxido mangánico ha sido formado puede absorber iones manganesos e inducir su oxidación:



La reacción continúa generando óxido mangánico que ayuda a la remoción de iones manganosos, por su alta capacidad adsortiva.

El curso de la reacción autocatalítica del Mn puede representarse por la ecuación 3.7.

$$-\frac{d(\text{Mn}^{+2})}{dt} = K_1 (\text{Mn}^{+2}) + K_2 (\text{Mn}^{+2})(\text{MnO}_2) \quad (3.7)$$

de la cual se observa que la concentración de MnO_2 influye directamente en la velocidad de oxidación del Mn^{+2} (a mayor concentración de MnO_2 se incrementa la velocidad de reacción). Por otro lado, el hidróxido férrico formado en la oxidación del Fe ferroso también ejerce gran efecto sobre la absorción (15) y/o adsorción (8) de iones manganosos.

3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SOLUBILIDAD DE LOS COMPUESTOS DE HIERRO Y MANGANESO

La presencia de Fe y Mn en el agua está condicionada por una serie de factores que afectan tanto el grado de solubilidad como la velocidad de las reacciones redox que se llevan a cabo.

Entre estos factores se encuentran los siguientes:

- a) pH
- b) Metales previamente precipitados

- c) Concentración iones carbonato/bicarbonato
- d) Actividad microbiana
- e) Formación de complejos
- f) Cloración

3.1.1 pH

El pH es un factor altamente influyente en todas las reacciones químicas. La oxidación del hierro por oxígeno disuelto es lenta a valores de pH de 6.5, pero la velocidad se incrementa directamente con el pH. La oxidación del manganeso requiere valores más elevados, normalmente en el rango de 9.0-9.5 (15).

Las figuras 3.1 y 3.2 representan el efecto del pH sobre la oxidación de los iones ferrosos y manganosos respectivamente, en las que se observa que para las relaciones de $\log \frac{[\text{Fe}^{2+}]_t}{[\text{Fe}^{2+}]_o}$ y $\log \frac{[\text{Mn}^{2+}]_t}{[\text{Mn}^{2+}]_o}$, el tiempo de reacción necesario disminuye considerablemente si el pH aumenta.

La figura 3.3 muestra comparativamente las zonas de pH favorables para la remoción efectiva de iones férricos y mangánicos en agua tratada, observándose que mientras el manganeso está presente aún a pH altamente alcalino (8.5-9.0), el hierro a esos mismos valores está completamente eliminado del agua.

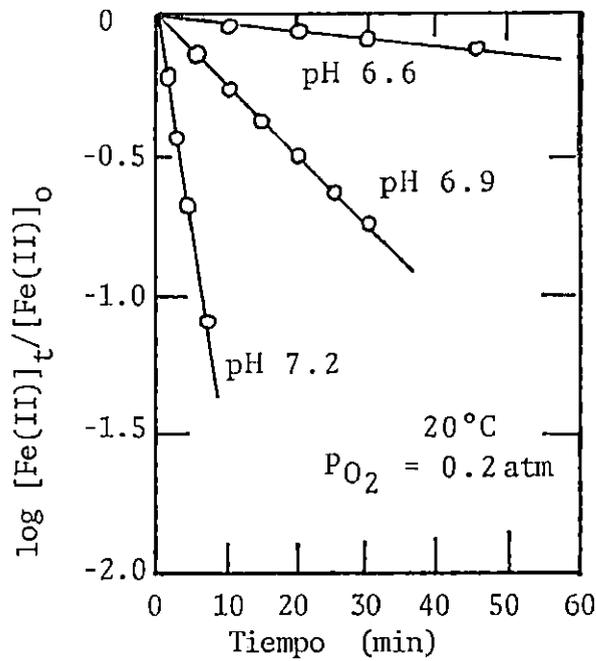


Fig.3.1 Oxidación de iones ferrosos en función del pH (17).

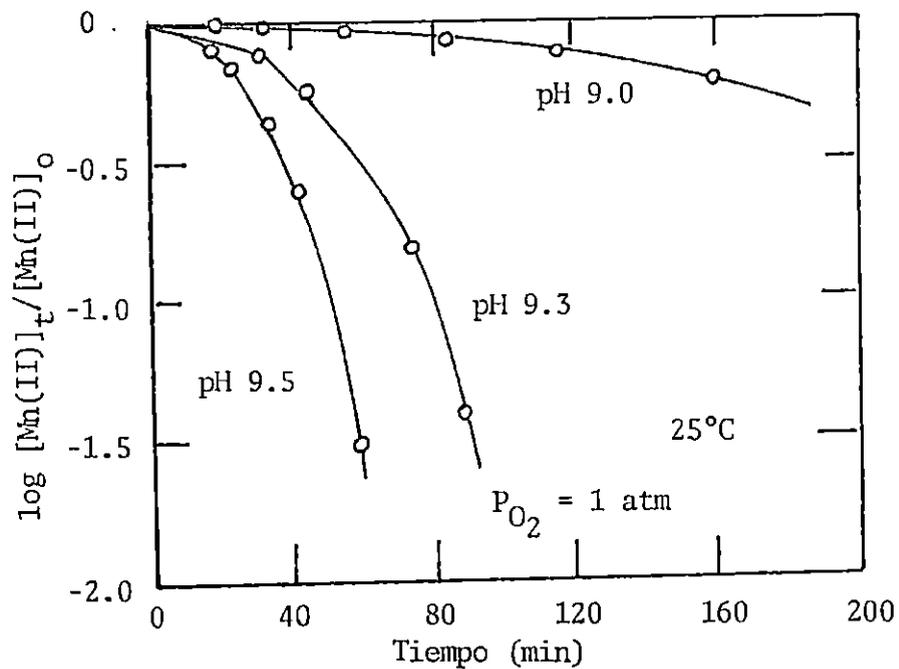


Fig.3.2 Oxidación de iones manganosos en función del pH (17).

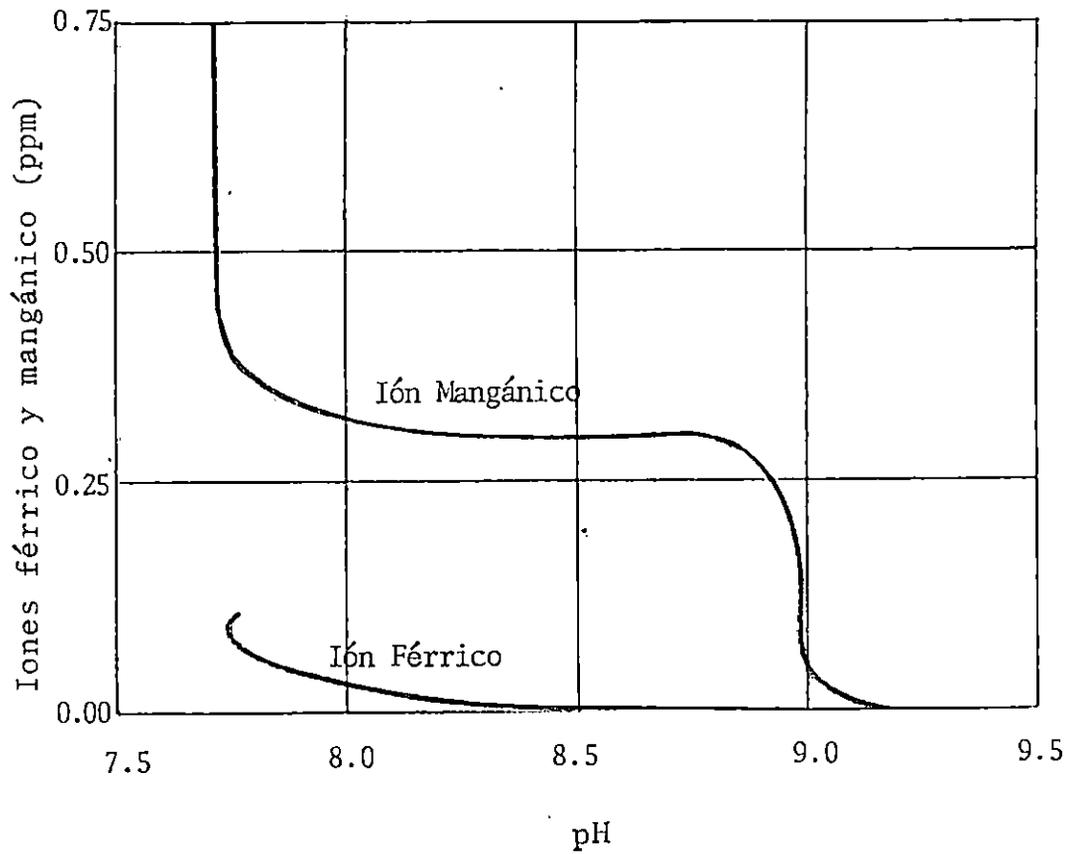


Fig. 3.3 Zonas de pH favorables para la remoción de iones férricos y mangánicos (8).

3.1.2 Efecto de Metales Previamente Precipitados

Los óxidos hidratados de Fe (III) y Mn (IV) tienen gran capacidad de adsorción y absorción de iones metálicos bivalentes. Por ejemplo, tanto el MnO_2 como el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ hidratados tienden a adsorber iones de hierro y manganeso. Las capacidades de adsorción de Mn^{+2} a un pH de 8.0 son del orden de 1.0 y 0.3 moles de Mn (II) por mol de MnO_2 y $\text{Fe}(\text{OH})_3$, respectivamente (17).

En aguas que contienen cantidades considerables de hierro ($[\text{Fe}(\text{II})]$, $[\text{Mn}(\text{II})]$) y no sólo manganeso, la remoción de Mn(II) es más fácil, pues se convierte predominantemente en un fenómeno de adsorción y/o absorción del Mn^{+2} sobre los precipitados de óxido férrico (17). Este fenómeno puede producirse también al recubrir previamente el material filtrante con óxidos o hidróxidos férrico y mangánico (8,15).

3.1.3 Concentración de Iones Bicarbonato/Carbonato

La naturaleza cambiante de los bicarbonatos en el agua afecta la solubilidad del hierro, debido a que éste generalmente se encuentra en asociación con ellos. La ocurrencia relativa a estas especies está íntimamente ligada al pH. Se ha observado que a valores de pH superiores de 8.0 ocurre una transición de bicarbonatos a carbonatos; por

el contrario a medida que se reduce el pH hay predominio de bicarbonatos y dióxido de carbono gaseoso libre. La tabla 3.1 es un resumen cualitativo de la solubilidad de los compuestos de hierro mencionados (19).

TABLA 3.1
SOLUBILIDAD DE ALGUNOS COMPUESTOS DE HIERRO (19)

Cación	Aniones		
	HCO_3^-	OH^-	CO_3^{2-}
Fe^{+2}	SS	VSS	VSS
Fe^{+3}	I	I	I

SS = poco soluble

VSS = ligeramente soluble

I = insoluble

3.1.4 Actividad Microbiana

El hierro y el manganeso en el agua pueden precipitar como parte o en asociación con una reacción biológica "las bacterias del hierro y manganeso", comúnmente llamadas "bacterias del hierro", son microorganismos que abstraen, oxidan, almacenan y/o precipitan tales metales (9).

Son muchos los tipos de bacterias que provocan estas reacciones, entre las más comunes se encuentran la Siderocapasa, Gallionella, Clonothrix y Leptothrix, estas dos úl

timas que pertenecen al género Crenothrix son las más abundantes (20).

Algunas bacterias derivan su nutrición y energía de las soluciones acuosas de compuestos ferrosos, otras usan los compuestos orgánicos como alimento y liberan ión férrico, muchas convierten el $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ a ión férrico y consumen el dióxido de carbono liberado y otras convierten el ión ferroso a la forma férrica y utilizan la energía liberada en presencia de compuestos orgánicos o inorgánicos (por ejemplo, hay complejas interacciones en muchos ambientes entre el Fe y los ciclos del azufre) (15,20).

Existen además otros microorganismos que afectan la oxidación espontánea del hierro ferroso a férrico, aún a pH ácido. Así, el thiobacillus ferrooxidans es capaz de catalizar dicha reacción, causando la precipitación del hierro férrico no como un hidróxido sino como un complejo mineral sulfatado. Algo similar ocurre con los microorganismos nitrificantes, los cuales al consumir oxígeno reducen el pH originando una reacción con las bases metálicas y si hay presencia de hierro y manganeso, éstos se resolubilizan por acción del pH (21).

En la mayoría de los casos el resultado es el desarrollo de un depósito de óxido de hierro de color negro o de óxido de hierro hidratado color café-rojizo unidos a una película gelatinosa de materia orgánica viviente (21).

3.1.5 Formación de Complejos

Los iones metálicos pueden formar parte de complejos, tanto orgánicos como inorgánicos.

En el caso de complejos orgánicos, se puede hablar de la interacción de metales con la sustancia húmica: se ha observado que en muchas aguas naturales, el Fe(III) está asociado con el color que causa la materia orgánica. No existe duda respecto a la capacidad de los materiales húmicos para combinarse con metales; es la naturaleza de la asociación la que es objeto de estudio, esta puede ser: (1) la formación de complejos o quelatos entre los grupos funcionales de la sustancia húmica y el metal y (2) una asociación entre las sustancias húmicas y una partícula coloidal de hidróxido metálico (posiblemente por sorción sobre la superficie de la partícula), por la cual las partículas coloidales se peptizan, es decir se estabilizan en suspensión y se evita su coagulación y asentamiento (2).

Las concentraciones elevadas de metal (que sobrepasan los límites de solubilidad del hidróxido metálico) y las altas relaciones de metal a sustancia húmica favorecen la formación de partículas peptizadas en preferencia a los complejos solubles (2).

Con respecto a los complejos inorgánicos, éstos pueden ser solubles o insolubles, por ejemplo las especies hidrolizadas del hierro y manganeso forman polímeros a través

de la formación de puentes con iones OH^- y $\text{O}^{=}$ (procesos de nomi olación y oxolación), lo que tiene como consecuen cia la formación de precipitados, por lo tanto la concentra ción de especies de hierro y manganeso en solución será ba ja (2).

Además cuando estos metales interactúan con sílice, cloro, dióxido de carbono, fosfatos, iones y moléculas que contienen azufre, se forman complejos que incrementan su solubilidad.

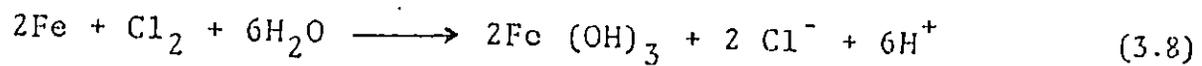
En aguas con alto contenido de sílice se ha identificado también, la formación de un complejo entre el hierro férrico y la sílice, el cual interfiere con la hidrólisis y polimerización del hierro (III).

3.1.6 Cloración

El cloro se utiliza muy ampliamente en aguas y drenajes como agente oxidante y desinfectante. Como agente oxi dante se le emplea para la oxidación de Fe(II) y Mn(II) (2).

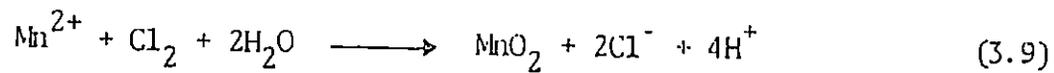
Para la remoción de hierro se aplica cloro en 0.7 veces el contenido de hierro que se va a remover, a un pH en tre 4 y 10. El tiempo de reacción es casi instantáneo (22).

La reacción que se realiza se representa con la ecuación 3.8 (22).



Para la eliminación de manganeso es necesario aplicar cloro en cantidad de 0.9 veces el contenido de manganeso que se va a remover, a un pH de 7 a 10. La reacción se completa en aproximadamente 3 horas (22).

La reacción se representa por la ecuación 3.9 (22).



IV. PROCESOS UNITARIOS INVOLUCRADOS EN LA REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO DE LAS AGUAS

Son muchos los procesos y operaciones unitarias relacionados con la remoción de hierro y manganeso, pero únicamente se considerarán con cierto detalle las que se relacionan directamente con el sistema a evaluar. Para el caso se reducen a:

- 1) Aireación y
- 2) Filtración

4.1 AIREACION

La aireación es un proceso mediante el cual el aire y el agua entran en íntimo contacto, ya sea por la exposición de gotas o láminas delgadas de agua en el aire o por la introducción de pequeñas burbujas de aire, que se difunden a través del líquido (9).

En ambos procedimientos, la aireación está acompañada por (9):

- a- Una acción de purificación por arrastre, la cual remueve gases indeseables, disueltos en el agua, ya sea porque ha sido tomado del aire que rodea al agua o como subproductos de reacciones químicas o biológicas en el agua; y

- b- Una acción oxidativa sobre ciertos metales y gases presentes en el agua.

La aireación es muy útil cuando el Fe y Mn se encuentran en forma soluble en las aguas deficientes de oxígeno, así los óxidos inferiores de estos metales, en combinación con CO_2 pueden convertirse en óxidos superiores insolubles, los cuales posteriormente pueden ser removidos por sedimentación y/o filtración (9).

Otros constituyentes afectados por la aireación son el dióxido de carbono, cuya remoción incrementa el pH alcanzando rangos efectivos para la remoción de Fe y Mn; el SO_2 que afecta la eliminación de Fe y Mn, pues se necesitan altos valores de pH y dosis elevadas de oxidantes y los sabores y olores provocados por materias volátiles (9).

4.1.1. Tipos de Aireadores

Las principales categorías de aireadores son dos (9):

- A. Aireadores agua en aire y
- B. Aireadores aire en agua

Ambos tipos persiguen crear una gran área de contacto entre el aire y el agua, mayor que la que ocurre en forma natural.

A. Aireadores Agua en Aire

Los diseños característicos incluyen los siguientes:

- De cascada y de cono, en los cuales el agua se deja caer sobre obstáculos para producir turbulencia y variar las superficies del agua en contacto con la atmósfera.
- De bandeja de coque, las cuales se llenan de cualquier material de contacto que al recubrirse de una película de óxidos cataliza las reacciones de oxidación de los compuestos ferrosos y manganosos causando su precipitación (17).
- De aspersion, donde el agua fluye a alta presión, por medio de pequeñas toberas, como un fino rocío cayendo a través del aire que la rodea.
- De tiro o corriente de aire, provistos de un soplador el cual provee de un flujo de aire continuo.

B. Aireadores Aire en Agua

Los principales modelos incluidos en esta clasificación son (9):

- De tubo forzado, equipado de tal forma que crea un vacío parcial que provoca la entrada del aire que posteriormente se mezcla con el agua contenida en un tanque.
- De difusión, cuyo sistema típico consta de un tanque equipado con tuberías de aire comprimido, manifold o difusores, representado en la figura 4.1. El difusor libera pequeñas burbujas de aire comprimido dentro del agua las cuales emergen lenta, pero turbulentamen

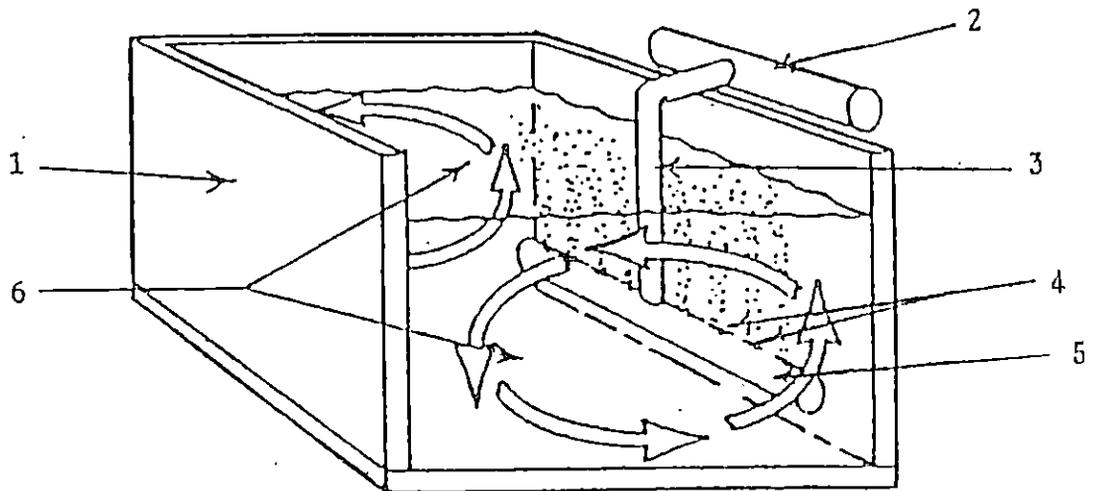
te, con lo que se favorece grandemente la transferencia aire-agua.

La pieza esencial de este sistema lo constituye ya sea un soplador o un compresor que suministra el flujo de aire continuo.

Este tipo de aireador se usa frecuentemente para incrementar el contenido de oxígeno disuelto (OD) y prevenir así olores y sabores desagradables.

Además el constante abastecimiento de OD, provee la cantidad necesaria para oxidar compuestos ferrosos y manganosos en forma eficiente.

Este modelo de aireador se ha considerado como el más conveniente para los fines del presente estudio, pues además de eficiente resulta muy conveniente en el sentido técnico y práctico, dados los recursos con los que se cuenta para la realización de la investigación. El diseño y construcción del sistema puede realizarse con material resistente y de bajo costo (PVC), además de que se cuenta con un compresor capaz de suministrar el oxígeno requerido.



1. Tanque de aireación.
2. Tubería de aire comprimido.
3. Tubería descendente.
4. Difusores.
5. Tubería múltiple (manifold).
6. Patrones de mezclado.

Fig.4.1 Esquema del modelo de aireador por difusión, utilizado en la oxidación de compuestos ferrosos y manganosos (9).

4.2 FILTRACION

El propósito de la filtración es la remoción del material suspendido en el agua. Este material suspendido puede incluir flóculos provenientes de procesos de coagulación, floculación o sedimentación y microorganismos; precipitados como carbonato de calcio resultante de la suavización con cal o cal-soda ash de un agua superficial o subterránea; y precipitados de Fe y Mn de fuentes de agua subterránea (9).

Este material en suspensión es removido cuando el agua pasa a través de un lecho de material granular conocido como medio filtrante. El medio filtrante utilizado comprende arena, coque, carbón vegetal, partículas de mármol, magnetita, lava, carbón de antracita, tierra diatomácea, asbesto o sustancias similares fabricadas especialmente (9).

La filtración primordialmente depende de la combinación de mecanismos complejos tanto físicos como químicos, siendo el más importante la adsorción. Conforme el agua atraviesa el lecho filtrante las partículas suspendidas entran en contacto y son absorbidas sobre la superficie de los granos individuales o sobre material previamente precipitado (9).

4.2.1 Tipos de Filtros

Se dividen en tres grandes grupos:

- A. Filtros a gravedad
- B. Filtros a presión
- C. Filtros de oxidación

A. Filtros a Gravedad

Estos pueden ser, en virtud de las velocidades de flujo, lentos o rápidos. Generalmente utilizan arena como me di o fi l tr an te.

Tanto los filtros de arena rápidos como los lentos re m ue ve n el hierro y el manganeso oxidados. El manganeso, precipita lentamente y responde mejor a la filtración rápi da, a menos que haya sido adecuadamente floculado. Si la arena se cubre con manganeso la precipitación se favorece por catálisis (17).

B. Filtros a Presión

Estos filtros son esencialmente similares a los fi l tr os de gravedad, con la excepción de que el material fi l tr an te está contenido en un tanque cerrado y de que el agua es forzada a través del lecho filtrante bajo una presión relativamente alta. De la misma manera que los de gr av e d a d, pueden utilizarse con un medio o una combinación de ellos.

Comúnmente los filtros de arena a presión se utilizan para la remoción de Fe y Mn de agua subterránea. El agua es usualmente aireada o tratada con permanganato de potasio para oxidar los metales. El precipitado químico es removido posteriormente por filtración (17).

En los filtros a presión acontece una considerable penetración de materia en suspensión al lecho filtrante, asimismo, la fuga de sólidos se puede presentar cuando se prolonga el período de filtrado entre lavados.

C. Filtros de Oxidación

El proceso de filtración, una fase necesaria en el acondicionamiento del agua, varía de acuerdo con el tipo de medio filtrante utilizado y con el diseño del sistema. Mientras la filtración en sí se considera generalmente como un fenómeno básicamente mecánico, ciertos medios filtrantes poseen tanto propiedades químicas como capacidad de filtración. Entre los filtros no mecánicos están incluidos los filtros oxidativos y los lechos de contacto.

Tanto el Fe como el Mn son contaminantes muy comunes en las aguas subterráneas y su remoción resulta a veces muy difícil, debido a la naturaleza del agua cruda. Por ejemplo, cuando ambos metales están presentes, la reducción efectiva de uno de ellos no significa necesariamente el mismo efecto sobre el otro. Este problema está relacionado

principalmente con sistemas que involucran aireación y sedimentación seguida de filtración convencional. Los lechos de contacto y filtros oxidantes, por otro lado, tienen por objeto facilitar la oxidación del Fe y Mn por la acción catalítica de los óxidos de esos metales previamente precipitados en los granos del medio filtrante. El mecanismo básico consiste en que conforme el agua atraviesa el lecho, los productos de la oxidación y precipitación son removidos al mismo tiempo que la reacción se completa (18). El material de contacto incluye desde arena, grava, lava, mena pirolusita o coque hasta productos comerciales como el Greensand (zeolita manganésica), Birm, Filox, etc. Las zeolitas de manganeso se obtienen tratando zeolita sódica con cloruro o sulfato manganeso, los cuales son oxidados posteriormente por tratamiento con permanganato de potasio, de tal manera que se forman óxidos insolubles de mayor valencia sobre la superficie de los granos, quedando oxígeno disponible con capacidad para convertir los iones ferrosos y manganesos presentes en el agua a sus formas oxidadas insolubles, las cuales pueden eliminarse por filtración(14).

La eficacia de los lechos de contacto y de los filtros oxidativos depende de la capacidad catalítica de los compuestos oxidados adheridos a los granos del medio o del efecto equivalente que produzca cada medio, por lo que el lavado de los primeros conviene que no se haga en forma com-

pleta, sino que se limite a separar de vez en cuando los depósitos en exceso, limpiando con una fuerte corriente de agua proyectada por una manguera si son lechos abiertos, o a contracorriente si se trata de lechos cerrados. Respecto a los segundos como el caso de las zeolitas de manganeso, pueden regenerarse por lavado a contracorriente con una solución de permanganato, a no ser que se hagan aplicaciones continuas de permanganato al agua cruda (10).

En la tabla 4.1 se presentan algunos medios filtrantes oxidativos, disponibles bajo nombres comerciales, con características que demuestran su elevada capacidad de remoción de Fe y Mn.

TABLA 4.1
CAPACIDAD DE REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO
DE ALGUNOS FILTROS COMERCIALES (67)

Parámetro	Filtro Comercial		
	Birm	Filox	Greensand de Mn
Rango de pH	6.8 ó mayor	3-12	6.2-8.8
Regenerante	Ninguno	Ninguno	$KMnO_4$
Requerimiento de oxígeno <u>di</u> suelto	15% del contenido de Fe	Ninguno	Ninguno
Capacidad de remoción de Fe^{+2}	32,404.4 mg/pie ³	312,000 mg/pie ³	40,000 mg/pie ³
Capacidad de remoción de Mn^{+2}	-----	1,040,340 mg/pie ³	20,000 mg/pie ³ .

V. PLANTAS DE REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO

Las diversas instalaciones destinadas a remover el Fe y Mn están relacionadas entre sí y deben proyectarse coordinadamente. A continuación se presentan algunas estructuras utilizadas para las distintas fases de los métodos de remoción de Fe y Mn.

5.1 DEFERRIZACION DE AGUA SUBTERRANEA

El agua captada en una capa profunda del terreno contiene a menudo una solución de compuestos ferrosos, pero por la aireación y la filtración se verifica una deferrización, puesto que dicho compuesto de Fe al contacto del aire se convierte en hidrato férrico insoluble que puede ser separado del agua por filtración (23).

Si los componentes de Fe son poco estables basta la aireación, cuya duración ha de acomodarse al contenido de Fe. Si las combinaciones son más estables y si existen sustancias húmicas es además preciso un tratamiento previo del agua por adición de coagulantes. El ácido sulfhídrico contenido a menudo en el agua ferruginosa lo mismo que la coloración amarilla o parda debida a la sustancia húmica desaparecen con el empleo de los compuestos antes mencionados. La aireación del agua puede efectuarse en instalaciones abiertas o cerradas. En las primeras el

agua se airea, dividiéndose en gotas, en forma de lluvia o por irrigación. La caída en forma de lluvia, en sus rasgos fundamentales, está representada en la figura 5.1. El agua cae desde una regadera (B) situada a una altura de 2 m, hasta un filtro (F), a cuya capa de agua se le da mayor o menor altura (0.5-2 m) según la facilidad de separación del Fe. El agua que contiene Fe no debe ser filtrada inmediatamente después de su aireación, pues aunque durante su caída se ha saturado de aire, conserva su transparencia y hasta después de 1/2 a 1 1/2 horas no desprende copos de hidróxido de Fe insolubles. Después de formados los copos, el agua atraviesa el filtro de grava (K) de 30 cm de profundidad, va ascendiendo como agua ya depurada hacia la cámara de agua limpia y sale al punto de consumo o a un depósito de agua limpia (R). La altura máxima de presión en el filtro es de 40-50 cm, la velocidad promedio de filtración es de 1 m/h (23).

La caída por irrigación, representada en la figura 5.2, se realiza distribuyendo el agua (B,C) sobre trozos de coque (G) y en lugar de un filtro de grava se emplea un filtro de arena (F), cuya capa de lecho tiene un espesor de 1.5-2.0 m, con una velocidad de filtración de 0.5 a 0.6 m^3/m^2 de superficie de medio filtrante.

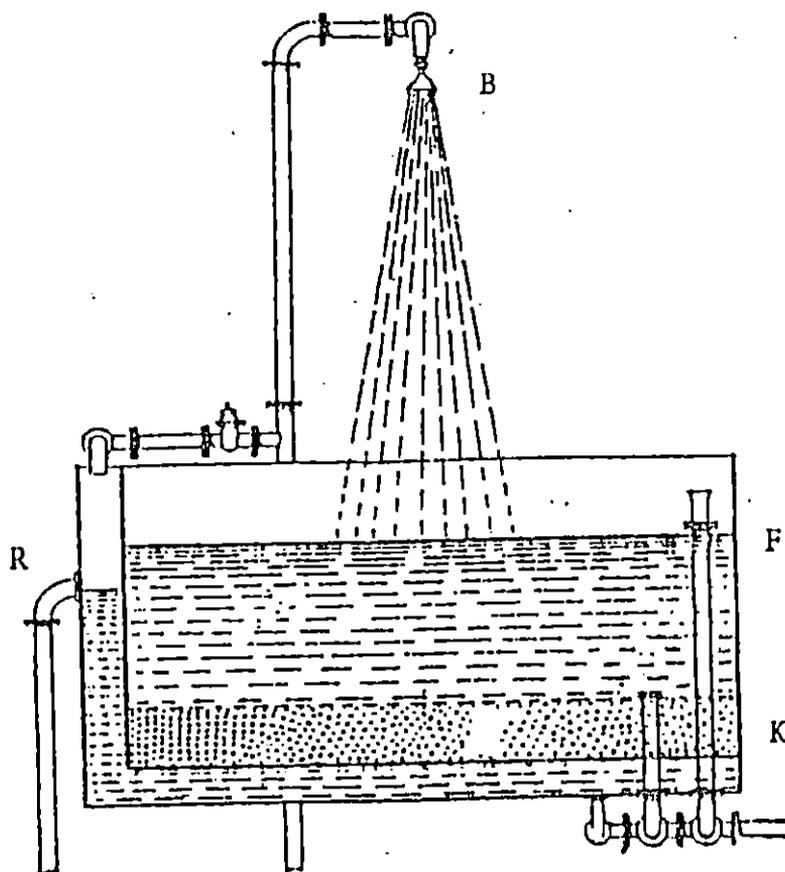
En términos generales la irrigación es más confiable que la caída en forma de lluvia, pues el tiempo y área de

contacto para la verificación de la oxidación de los compuestos ferrosos son mayores, por esta razón la primera, en sus distintas formas, es la que se prefiere para deferrizar agua (23).

Entre las instalaciones cerradas se encuentra el sistema BREDA, mostrado en la figura 5.3. Este sistema consta de dos partes, un recipiente de contacto (A) y un filtro (B). El primero se llena con material de contacto constituido por trozos de desecho de la fabricación de porcelana o por coque de lava en granos de distinto tamaño. Este material por ser resistente, de cantos agudos y por poseer poros sólo en la superficie y no en el interior, excluye la adherencia permanente de lodo y otras impurezas.

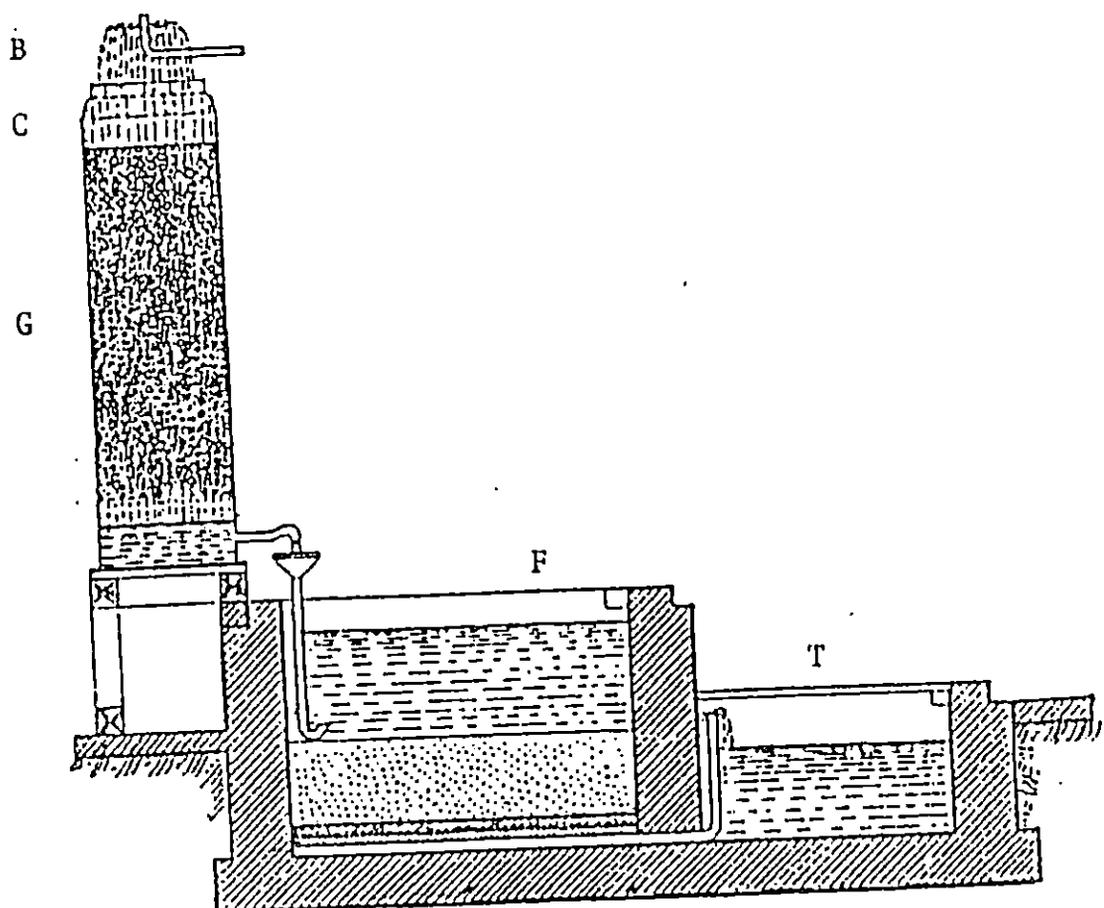
El filtro se llena con grava limpia. El agua recibe una adición de aire comprimido al entrar al sistema (M) y posteriormente pasa a una cámara mezcladora desde donde pasa a la cámara de contacto (A) y es comprimida a través del material de contacto para luego ser conducida al filtro. Después de atravesar el filtro el agua limpia se envía a la zona de abastecimiento.

Como material de contacto puede utilizarse también limonita (mineral de hierro) (23).



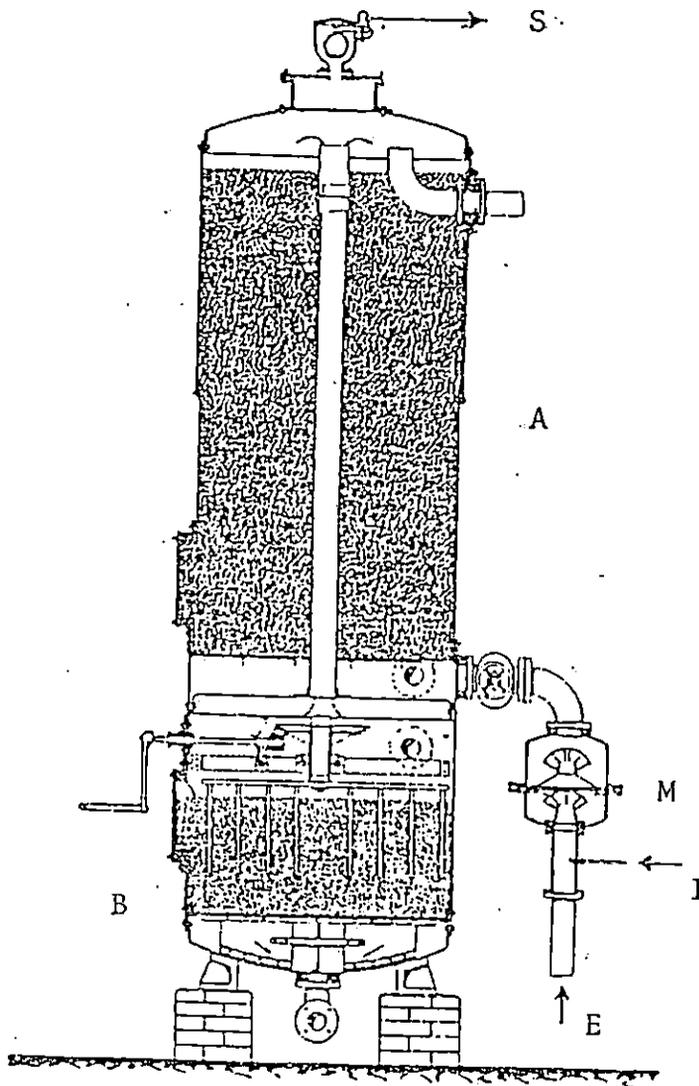
- B. Regadera
- F. Filtro
- K. Lecho de grava
- R. Salida al depósito de agua tratada

Fig.5.1 Esquema de la caída en forma de lluvia para la deferrización del agua (23).



- B,C Distribuidores de agua cruda
 G Lecho de coque
 F Filtro de arena
 T Tanque de recolección de agua tratada

Fig.5.2 Esquema de la caída por irrigación para la deferrización del agua (23).



- A Cámara de contacto
- B Filtro
- E Entrada de agua cruda
- I Ingreso de aire comprimido
- M Adición de aire comprimido
- S Salida de agua tratada

Fig.5.3 Instalación de deferrización cerrada (sistema Breda) (23).

5.2 DESMANGANIZACION DE AGUA SUBTERRANEA

El manganeso se presenta disuelto en el agua como bicarbonato o sulfato y casi siempre acompaña al Fe. Pequeñas cantidades de Mn pueden separarse por una buena aireación y mejor aún si se emplea irrigación. Para cantidades altas de Mn se recomienda en algunos casos irrigación sobre lignito. Si el Mn está presente como sulfatos, se suelen utilizar otros métodos como el de la permutita (zeolita artificial) mostrado en la figura 5.4. En las plantas de eliminación de Mn se utiliza la acción catalítica del dióxido de Mn. Se disponen lechos de contacto de coque o piedra recubiertos con óxido mangánico o lechos de pirolusita y se hace pasar agua a velocidad de 4-12 gal/min/pie² (17).

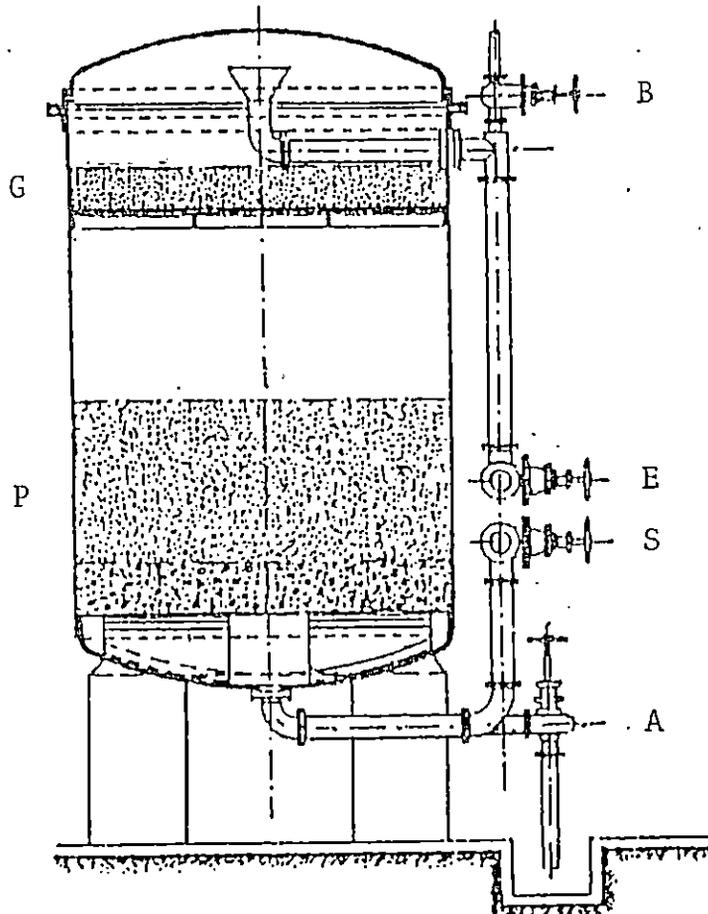
En uno de los métodos el agua asciende a través de la pirolusita finamente triturada y se distribuye en la superficie de un lecho de percolación de coque en trozos pequeños. El lecho de coque sirve a la vez como aireador y como soporte para la película catalítica de óxido mangánico. Desde el coque el agua fluye a través de un filtro de arena abierto que elimina el Mn residual (20%) y el Fe. Esta planta es de operación automática y no se emplean productos químicos. El agua cruda entra con un promedio de 1.2 ppm de Fe y 0.8 ppm de Mn, que son eliminados completamente, y con un pH de 7.3. Generalmente no se requiere

re ningún ajuste de pH, pero algunos investigadores han demostrado que la oxidación catalítica del Mn se efectúa mejor con valores de pH superiores a 8.5. El mismo proceso de eliminación de Mn ocurre en los filtros de arena ordinarios que han sido recubiertos con Mn oxidado (23). El Mn presente en aguas crudas sujetas a filtración ordinaria también puede quitarse mediante la coagulación y precipitación con coagulantes químicos, caparrosa y cloro..(17).

A veces se requiere también del uso de oxidantes químicos fuertes, han sido sugeridos particularmente ozono, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio. El Mn y Fe junto con otros minerales productores de dureza pueden también ser eliminados por intercambio de cationes (17).

5.3 METODOS COMBINADOS DE REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO.

En la mayoría de plantas de remoción de manganeso se ve favorecida también la remoción del hierro, lo que no ocurre generalmente en el caso inverso. Este apartado describirá brevemente algunas plantas en las cuales se utilizan principios para lograr la remoción de ambos metales a través de la combinación de las operaciones citadas anteriormente.



- A Entrada de solución salina
- B Salida de solución salina
- E Entrada de agua cruda
- S Salida de agua tratada
- G Lecho de grava
- P Lecho de permutita

Fig.5.4 Desmanganización del agua a través del método de la permutita (17).

En algunos casos, cuando el agua es insuficientemente alcalina y contiene sulfato ferroso, los hidróxidos insolubles de Fe o Mn pueden formarse por adición de un álcali tal como la cal o la soda. Con el Fe la precipitación puede ocurrir a pH de 6.5, pero el Mn puede no precipitar hasta que se alcanza un pH de 9.0. Puede agregarse también un coagulante para asegurar la precipitación, asimismo el cloro puede utilizarse para acelerar la velocidad de oxidación. Ambos metales se remueven del agua cuando ésta se suaviza por el tratamiento con cal-soda. Este método consta de aireación a través de bandejas de coque seguido de elevación del pH y posterior filtración a presión (fig.5.5) (14).

Otro método combinado de eliminación de ambos metales se representa en la figura 5.6, consta básicamente de oxidación a través de precloración y aireación, filtración por contacto, supercloración (para garantizar oxidación y desinfección completas), sedimentación y finalmente filtración en un lecho de arena para eliminar cualquier resto de material floculado (14).

En la figura 5.7 se esquematiza la remoción de Fe y Mn utilizando inyección de aire comprimido con posterior filtración en un lecho múltiple de lava volcánica, antracita y calcita y desinfección por cloración (14).

Por otro lado, algunas aguas ligeramente ácidas proveen un ambiente adecuado para el desarrollo de la bacteria de hierro. Esta bacteria vive en la materia orgánica y excreta Fe en forma de óxidos hidratados, los cuales se adhieren a las tuberías. Los óxidos depositados pueden desprenderse y penetrar al sistema de los equipos. Para solventar este tipo de problema y prevenir el crecimiento bacteriano se utiliza el tratamiento con cloro o álcali (14).

Actualmente se utilizan con mucho éxito los filtros oxidativos o no mecánicos, en los que el principio básico es el efecto autocatalítico de metales previamente precipitados.

Los medios filtrantes más utilizados se conocen por los nombres comerciales de Greensand, Birm, Filox y Filter Ag.

El Greensand es un material granular, de color verde cuando está seco, impregnado con dióxido de manganeso. El proceso de remoción de Fe y Mn emplea dos técnicas basadas en la regeneración del medio filtrante. Una se refiere a la regeneración intermitente (IR), en la cual una solución de permanganato de potasio se pasa intermitentemente a través del lecho de Greensand de manganeso. La otra, llamada regeneración continua (CR), involucra la alimentación cons-

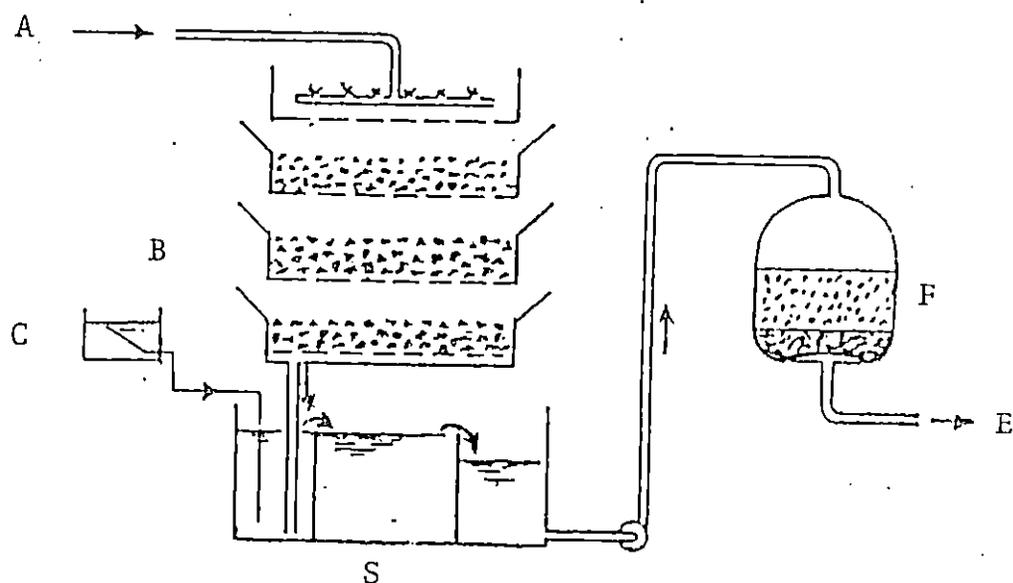
tante de una solución de permanganato al agua que está entrando al filtro. El esquema de este método está representado por la figura 5.8.

Tanto la CR como la IR involucran procesos de oxidación-reducción. De tal forma que es necesario tener información de las sustancias reductoras presentes en el agua para poder determinar la cantidad de oxidante requerido (25).

5.4 PLANTAS DE TRATAMIENTO UTILIZADAS EN EL SALVADOR

Las plantas de tratamiento de agua para la eliminación de Fe y Mn en el país pueden dividirse en las pertenecientes al sector privado y las que están bajo el control de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). En las primeras, el método de mayor éxito es el Greensand, muy utilizado en diversas industrias y en comunidades autoabastecidas (San Juan Opico, administrada por Especialidades Industriales (ESPINSA). La inversión en la instalación de este sistema es considerable, sin embargo se prefiere por su alta efectividad, ya que ambos metales son removidos totalmente. Respecto a las segundas, se puede observar que de 15 plantas potabilizadoras, 11 están destinadas a la deferrización y a la desmanganización parcial. Nueve de ellas tratan aguas prove

nientes de acuíferos cercanos al Lago de Ilopango, en particular son deferrizadoras/desmanganizadoras las de Gulu-chapa I y II y la de Joya Grande. En la tabla 5.1 se resu

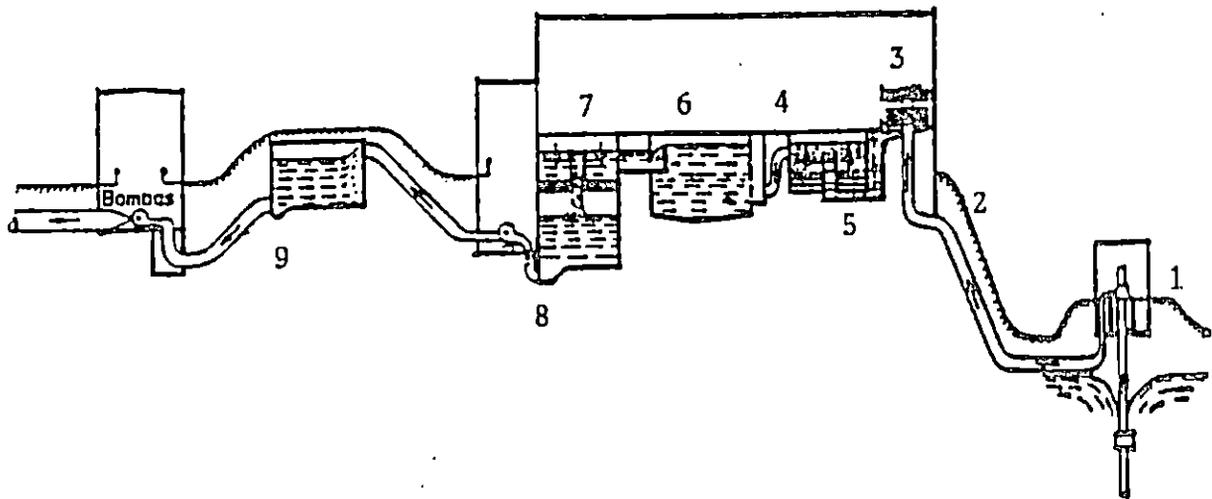


- A Entrada de agua cruda
- B Aireador de bandejas
- C Alimentación de cal
- S Sedimentador
- F Filtro a presión
- E Salida de agua tratada

Fig.5.5 Remoción de hierro y manganeso por medio de aireación y suavización con cal (18).

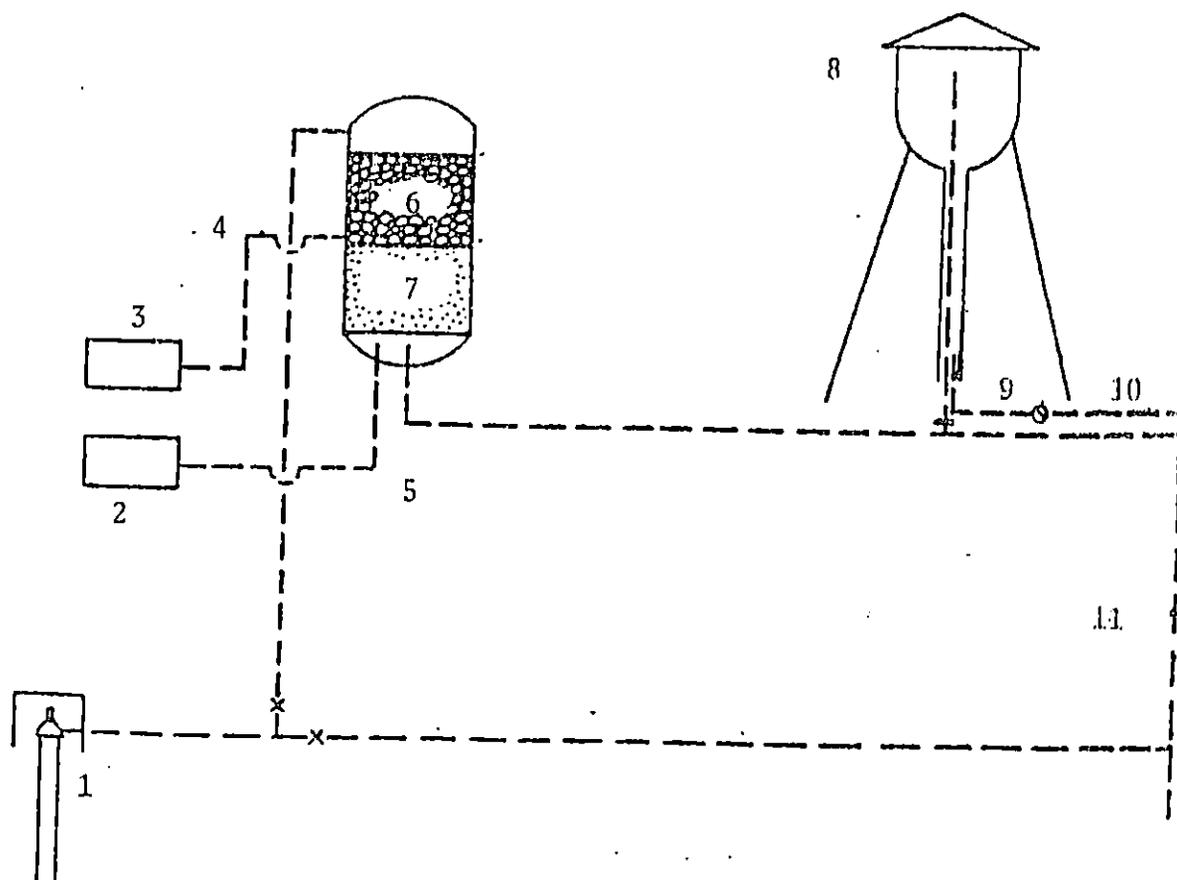
men datos importantes sobre las plantas mencionadas (26).

Los procedimientos básicos utilizados por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANANDA) son los siguientes (26):



1. Pozos
2. Precloración
3. Aireación
4. Filtros de contacto
5. Supercloración
6. Sedimentación
7. Filtros de arena
8. Pozo de agua clarificada
9. Sistema de distribución

Fig. 5.6 Remoción de hierro y manganeso a través de cloración, filtración por contacto y filtración convencional (14).



1. Bomba de alta presión en los pozos
2. Inyector de aire
3. Compresor
4. Aire comprimido para la oxidación
5. Aire comprimido para el retrolavado
6. lecho de lava
7. Lecho de arena y calcita
8. Tanque elevado de agua tratada
9. Válvula de retención
10. Eluente del tanque
11. Sistema de distribución

Fig.5.7 Remoción de hierro y manganeso por medio de airca ción y filtración en lecho múltiple (14).

Regeneración continua (CR)

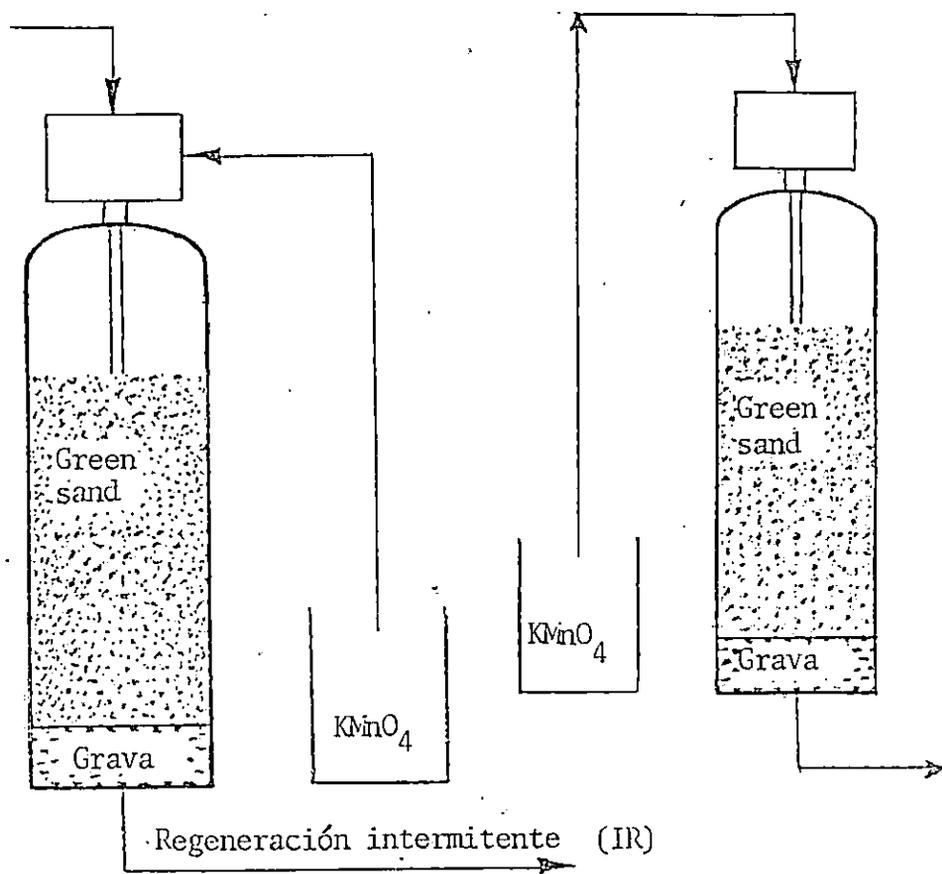


Fig.5.8 Remoción de hierro y manganeso a través del sistema Greensand (25).

1. Floculación del Fe soluble mediante aireación natural o forzada (Guluchapa I y II, San Miguel Tepezontés).
2. Floculación del Fe y Mn solubles mediante la adición de cloro (todas).
3. Floculación y precipitación de parte del Mn soluble mediante dosificación de permanganato de potasio (Guluchapa II).
4. Barrido del flóculo de Fe y Mn por adición de coagulantes metálicos (Guluchapa II).
5. Retención del flóculo de Fe y Mn en filtros de arena, a gravedad o a presión (todas).
6. Adsorción del Fe y en especial del Mn, sobre granos de mantos filtrantes de arena de cuarzo u otras arenas, mantos que se regeneran con permanganato de potasio (todas, excepto San Miguel Tepezontes).
7. Eliminación de Fe y Mn por sorción en zeolitas manganosas que se regeneran con permanganato de potasio (La Coruña y Jardines del Pepeto).
8. Sedimentación del flóculo de Fe (Guluchapa I, San Miguel Tepezontes y La Esperanza).

Los resultados generales durante los 23 años en que se vienen empleando algunos procedimientos de deferrización no han sido muy alentadores; demuestran que no es fácil eliminar permanentemente el hierro y el manganeso, pues ello requiere tener niveles de operación y mantenimiento elevados. Una revisión de los análisis físico-químicos en cuanto a hierro y manganeso evidencia que las concentra-

TABLA 5.1

PLANTAS DE POTABILIZACION DE LA ADMINISTRACION NACIONAL DE
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (ANDA) (26)

Nº	UBICACION DE LA PLANTA	TIPO DE AGUA	FUENTE DE CAPTACION	CAUDAL DE DISEÑO (L/s)	PROBLEMAS EN EL AGUA	TIPO DE TRATAMIENTO	ZONA DE SERVICIO
1	Guluchapa I	Subterránea	Pozos	150	Fe y Mn	Deferrizadora	Soyapango, Ilopango
2	Guluchapa II	Subterránea	Pozos	250	Fe y Mn	Deferrizadora	Soyapango, Ilopango
3	Guluchapa III	Superficial	Río Cuaya	130	Turbidez y color	Convencional filtros rápidos	Soyapango, Ilopango
4	Joya Grande	Subterránea	Pozos	150	Fe y Mn	Deferrizadora	Santo Tomás, Santiago Texacuangos y San Marcos
5	Urbanización San José	Subterránea	Pozos	18.2	Fe y Mn	Deferrizadora	Urbanización San José, Soyapango
6	Urbanización Guayacán	Subterránea	Pozos	21.4	Fe y Mn	Deferrizadora	Urbanización Guayacán, Soyapango
7	Urbanización La Coruña	Subterránea	Pozos	14.6	Fe y Mn	Deferrizadora	Urbanización La Coruña, Soyapango
8	Urbanización Los Conacastes	Subterránea	Pozos	21.2	Fe y Mn	Deferrizadora	Urbanización Los Conacastes Soyapango
9	Jardines del Pepeto	Subterránea	Pozos	7.4	Fe y Mn	Deferrizadora	Jardines del Pepeto, Soyapango
10	San Miguel Tepezontes	Subterránea	Manantial	4	Fe y Mn	Deferrizadora	San Miguel y San Juan Tepezontes
11	Chilama	Superficial	Río Chilama	50	Turbidez y color	Convencional filtros rápidos	Puerto de La Libertad
12	Tamulasco	Superficial	Río Tamulasco	60	Turbidez y color	Convencional filtros rápidos	Chalatenango
13	Corinto-San Martín	Superficial	Lago de Ilopango	10	Arsénico, turbidez y color	Convencional filtros rápidos	En investigación, en un futuro Sn.Martín-Corinto
14	El Morro	Subterránea	Manantial	5	Fe	Deferrizadora	Cantón el Morro
15	La Esperanza	Subterránea	Manantial	5	Fe	Deferrizadora	Cantón La Esperanza

ciones de estos elementos en el agua tratada sufren drásticas alzas y bajas a lo largo del tiempo, y ello parece deberse, por un lado, a variaciones bastante acusadas en la calidad del agua cruda y por otro lado, a la forma y cuidado con que está operando y manteniendo la Planta, aunque también hay que considerar los efectos de los procedimientos de muestreo y análisis empleados.

En la tabla 5.2, se presentan las concentraciones y los porcentajes de remoción de hierro y manganeso promedio de las Plantas supervisadas por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), obtenidas en un estudio realizado por dicha institución (26).

TABLA 5.2

EFICIENCIA GLOBAL DE REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO EN PLANTAS POTABILIZADORAS DE LA ADMINISTRACION NACIONAL DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (ANDA)(26).

	Hierro Total	Manganeso Total
Agua cruda	1.3 mg/L	0.727 mg/L
Agua tratada	0.252 mg/L	0.311 mg/L
Remoción	80.6 %	57.2 %

VI. SELECCION DEL LUGAR DE TRABAJO

La finalidad del muestreo ha sido seleccionar un agua con características que permitan probar la efectividad del sistema a construir, principalmente en lo que se refiere a la remoción de Fe y Mn, y así escoger los lugares de trabajo para la realización de la experimentación.

6.1 LUGARES DE MUESTREO

Los lugares de muestreo se escogieron partiendo tanto de antecedentes de datos físicoquímicos reportados por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) como sugerencias de personas relacionadas con el área de tratamiento de aguas, específicamente en lo referente a problemas causados por Fe y Mn.

Otro factor que influyó en la selección fue la accesibilidad a tales sitios.

En la tabla 6.1 se presentan los datos de las concentraciones de Fe y Mn de las aguas de algunos lugares reportados por ANDA.

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas se elaboró una lista de lugares a ser muestreados, la cual se presenta en la tabla 6.2.

Es importante mencionar que las aguas a evaluar son de tipo subterráneo y que las muestras han sido tomadas de pozos profundos.

TABLA 6.1

CONCENTRACIONES DE HIERRO Y MANGANESO EN AGUAS DE DIFERENTES LUGARES REPORTADOS POR LA ADMINISTRACION NACIONAL DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (ANDA, 27)

LUGAR	pH	HIERRO (ppm)		MANGANESO (ppm)	
		TOTAL	SOLUBLE	TOTAL	SOLUBLE
San Bartolo	7.5	0.7	--	0.45	--
Eureka	7.1	13.4	--	2.08	--
San Martín	6.8	0.1	--	0.70	--
Sel-Sutt	7.1	1.1	1.30	0.65	0.65
El Pepeto	7.2	Trazas	1.00	0.85	0.80
San Felipe	7.5	0.5	0.20	1.12	0.80
Dolores	7.4	Trazas	0.00	0.00	0.00
Apastepeque	6.8	0.7	0.00	0.50	0.18
Tonacatepeque	7.2	Trazas	0.00	0.00	0.00
San Miguel Tepezontes	7.6	2.6	1.30	Trazas	0.00
Perulapía	7.0	2.0	0.20	2.50	2.00
Guluchapa	7.1	0.5	Trazas	0.50	0.40
Plan del Pino	7.1	0.1	0.00	Trazas	0.00
Matazano	8.3	0.2	Trazas	0.00	0.00

TABLA 6.2

LUGARES SELECCIONADOS PARA EL MUESTREO DE AGUA

L U G A R	UBICACION
Colonia El Pepeto	Soyapango
Jardines de Sel-Sutt	San Bartolo
Reparto San Bartolo	San Bartolo
Fábrica Eureka	Blvd.del Ejército
Hogar Divina Providencia	Santa Tecla
San Juan Opico	La Libertad
Guluchapa	Cantón Asino

6.2 TECNICAS DE MUESTREO

Para realizar convenientemente el presente estudio es necesario tomar en cuenta una serie de precauciones al momento de coleccionar la muestra de agua, con el fin de lograr una representatividad de la composición del agua del pozo que se está muestreando, en función del análisis a que será sometida (físicoquímico o microbiológico).

6.2.1 Recipientes de Muestreo

Los recipientes deben lavarse cuidadosamente, para dejarlos libres de cualquier tipo de impurezas.

Todas las muestras se coleccionaron en envases plásticos, a excepción de los destinados a análisis microbiológico

que fueron tomados en frascos de vidrio estériles.

En general, los recipientes para muestreo deben tener una forma segura de taparse, que evite el contacto con el aire y desequilibrios en la muestra colectada, para el caso ha sido usado un sello hermético con cinta teflón.

6.2.2 Tamaño de Muestra

El volumen de la muestra debe ser suficiente para efectuar todas las pruebas. Cada uno de los frascos ha sido llenado completamente, colectando 500 ml de agua en cada uno de ellos.

6.2.3 Procedimientos de Recolección

Para los análisis físicoquímicos al momento de tomar la muestra se abre la llave y se deja correr el agua durante 10 minutos o hasta que se observe que ya no salen flóculos, se deja rebosar y finalmente se cierra herméticamente el frasco para prevenir oxidación posterior de la muestra (28).

Para los análisis bacteriológicos, al inicio de la operación debe flamearse la boca del grifo o llave, luego ésta se abre y se deja fluir el agua durante 10 minutos, luego se restringe el flujo para llenar el recipiente sin salpicar. El frasco se destapa en el instante de ser llenado, se remueve el tapón y la caperuza que lo protege, te

niendo cuidado de no contaminarlos. El frasco se sostiene por la base, se llena sin enjuagar, inmediatamente se coloca el tapón y se asegura la caperuza alrededor del cuello del frasco (29).

6.2.4 Pretratamiento de las Muestras

De acuerdo con el análisis a realizar se da un pretratamiento a cada muestra. Son tres los tipos de muestra colectados:

a) Muestras al natural

Se colectan tal y como se sacan de la fuente sin ningún tipo de tratamiento.

b) Muestras acidificadas .

En el agua hay muchos cationes como el Fe^{+2} , Mn^{+2} y Mn^{+4} que pueden sufrir pérdidas por absorción o deposición en las paredes, también puede ocurrir oxidación y precipitación de tales cationes (3).

Para evitar estos problemas, si los análisis no se han de realizar inmediatamente, es necesario acidificar la muestra en el momento de colectarla.

La American Public Health Association (APHA) recomienda acidificar con HCl o HNO_3 concentrados. Para el caso se ha utilizado ácido nítrico concentrado en una dosis de 1 ml por cada 500 ml de muestra.

c) Muestras filtradas-acidificadas

En este caso la muestra se ha filtrado utilizando un filtro microbiológico de 0.45 micrones, con el fin de realizar análisis de compuestos solubles. La fase de acidificación procede después de la filtración en la forma descrita anteriormente.

6.2.5 Identificación y Transporte de la Muestra

Todas las muestras se identifican con una viñeta en la que se anota la fecha, lugar de procedencia, tipo de muestra (natural, filtrada o filtrada-acidificada) y cualquier otro dato que se considere importante.

Las muestras de agua al natural deben analizarse lo más pronto posible, principalmente si serán sometidas a análisis microbiológico, para lo cual lo más conveniente es colocar la muestra en hielo para su transporte al laboratorio y efectuar los análisis en término de 3 horas (29).

Respecto a las muestras acidificadas y filtradas-acidificadas, los análisis pueden realizarse posteriormente gracias al efecto preservante del ácido, aunque lo recomendable es efectuarlos lo más pronto posible (28).

6.3 ANALISIS DE LAS MUESTRAS DE AGUA

Los análisis físicoquímicos y biológicos del agua permiten al investigador conocer cualitativa y cuantitativa-

mente la calidad del agua, debida a las sustancias y organismos que contiene disueltos o en suspensión y que le otorgan ciertas características definidas. Además ningún tratamiento de agua será verdaderamente efectivo si no se basa en un programa de análisis de calidad, donde debe incluirse desde el agua cruda hasta el agua tratada, así como los puntos intermedios, con el fin de establecer los pa rámetros que deben ser corregidos de acuerdo con las normas de calidad de agua establecidas para diferentes usos, con lo cual se ahorran gastos innecesarios al seleccionar el equipo o sistemas más apropiados para su acondicionamiento.

6.3.1 Tipos de Análisis a Realizar

Los análisis se han clasificado, en forma general, en primarios y secundarios, dependiendo de la importancia relativa que tengan para los fines de estudio. Los primarios son aquellos parámetros a través de los cuales se pretende evaluar directamente la efectividad del sistema diseñado, siendo éstos las determinaciones de hierro y manganeso y los bacteriológicos; los secundarios son los que permiten, en conjunto con los anteriores, conocer la calidad global del agua que ingresa y sale del sistema de tratamiento.

Por otro lado, en forma específica, los análisis se han dividido de acuerdo con la naturaleza del pretratamiento dado a las muestras colectadas, de la siguiente manera:

- a) Muestras al natural
 - pH
 - Alcalinidad
 - Acido sulfhídrico
 - Materia orgánica
 - Bacteriológicos
- b) Muestras acidificadas
 - Hierro complejoado
 - Hierro total
 - Manganeso total
- c) Muestras filtradas-acidificadas
 - Hierro soluble
 - Manganeso soluble

A. Análisis Primarios

A.1 Análisis de Hierro

Justificación: En las muestras de agua el Fe se determinó en tres formas: total, complejoado y soluble. Cada una de las determinaciones resulta importante, pues por medio de la modificación que sufran al atravesar el sistema, se evidenciará la capacidad de remoción de los equipos de tratamiento utilizados, por el hecho de que el porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro es una de las variables respuesta contempladas en el Diseño Experimental.

El hierro ferroso, que es el que sufrirá la oxidación es un indicativo de la eficiencia de remoción, lo mismo sucede con el hierro férrico, que además es uno de los agentes que favorecen en la deposición del manganeso por adsorción.

Respecto al hierro complejado es necesario conocer si está presente, pues ésta es una de las formas de manifestación de hierro más difíciles de remover y será interesante determinar la medida en que el sistema puede ser capaz de reducirlo o eliminarlo.

A.1.1 Método de la Ortofenantrolina para Análisis de Hierro

El principio general del método es disolver y reducir todo el Fe al estado ferroso por ebullición con ácido e hidroxilamina haciéndose reaccionar posteriormente con 1, 10-0-fenantrolina, a valores de pH de 3.2 a 3.3. Tres moléculas de ortofenantrolina forman un quelato con cada átomo de hierro ferroso para dar lugar a un complejo de color rojo-naranja. La solución coloreada obedece la Ley de Beer, la intensidad del color es independiente del pH, en el ámbito de 3 a 9 y es estable cuando menos 6 meses (5). Las tres formas de hierro a analizar son las siguientes:

- Hierro total, proveniente de una muestra sin filtrar y acidificada (con el propósito de disolver el

Fe que puede haber flocculado para que se una al que está ya en forma soluble).

- Hierro soluble, proveniente de una muestra filtrada (filtro 0.45 micrones) y luego acidificada, y
- Hierro complejado o quelatado, proveniente de la misma muestra que la destinada al análisis de hierro total, pero en la que el análisis en vez de utilizar hidroxilamina se agrega hidrosulfito de sodio para reducir el hierro que se halle en forma compleja.

La metodología utilizada para análisis de hierro se detalla en el anexo A.

A.1.2 Resultados Obtenidos en el Análisis de Hierro

Los resultados de los análisis de Fe se presentan en la tabla 6.3.

A.2 Análisis de Manganeso

Justificación: La concentración de manganeso en agua cruda y en agua tratada es importante ya que dependiendo de su valor se conocerá si el sistema es eficiente o no en la remoción de éste.

El valor de la concentración de manganeso total o soluble será útil para la optimización de los equipos del sistema, indicando la cantidad de manganeso

TABLA 6.3

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANALISIS DE HIERRO
EN LOS DIFERENTES LUGARES DE MUESTREO

L U G A R	Fe Total		Fe Soluble		Fe Complejado		Fe Insoluble	
	Cm(ppm)	CV (%)	Cm(ppm)	CV (%)	Cm(ppm)	CV (%)	Cm(ppm)	CV (%)
Colonia Sel-Sutt	0.55	0.00	0.24	2.88	0.13	0.00	0.31	1.40
Reparto San Bartolo	0.39	0.00	0.215	1.66	0.30	0.00	0.18	0.80
Colonia El Pepeto	0.27	2.57	ND	--	0.12	0.00	0.27	2.50
Fábrica Eureka	0.66	2.11	0.495	2.17	0.10	0.00	0.17	2.13
Hogar Divina Providencia	1.63	0.00	ND	--	0.24	0.00	1.63	0.00
San Juan Opico	1.95	1.45	0.56	1.25	0.45	0.00	1.39	1.35
Guluchapa	1.15	1.20	1.01	1.50	0.27	1.20	0.14	1.30

Nota: Cm, concentración promedio de dos repeticiones.
CV (%), coeficiente de variación de las repeticiones.
ND no detectable por el método utilizado.

disuelto que es necesario remover (al inicio) y la que no pudo ser removida (al final), para obtener con estos datos, el porcentaje de rendimiento del proceso.

A.2.1 Método del Peryodato para Análisis de Manganeso

Con el peryodato como agente oxidante, obrando sobre compuestos manganosos solubles para formar permanganato, se sigue muy bien la ley de Beer en concentraciones hasta de 15 ppm. La intensidad del color no se afecta por las variaciones en la concentración del ácido o del peryodato y el color es estable por varios meses. Para obtener una oxidación completa de cantidades muy pequeñas de manganeso (0.01 ppm o menos), se agrega nitrato de plata y se prolonga el calentamiento (30).

Se deben eliminar o destruir las sustancias reductoras capaces de reaccionar con el peryodato o con el permanganato, antes de intentar la oxidación con el peryodato. Aunque el cloruro, en pequeñas cantidades, puede oxidarse por el peryodato, es mejor eliminarlo por evaporación con ácido sulfúrico, especialmente cuando la muestra sólo contiene una pequeña cantidad de manganeso. Sin embargo, este tratamiento conduce generalmente a la deshidratación de sílice y a la producción de turbiedad. La interferencia por

otras sustancias oxidables, incluyendo materias orgánicas, se puede eliminar por ebullición con ácido nítrico. Se agrega el ácido fosfórico para decolorar el hierro férrico, por la formación de un complejo, previniendo la precipitación posible de los peryodatos o yodatos de manganeso. No interfieren los metales extraños, salvo aquellos cuyos iones son coloreados (30).

La concentración mínima determinable es 0.005 mg de Mn. La metodología utilizada se detalla en el anexo A.

Las dos formas de manganeso a determinar son las siguientes:

- Manganeso total, proveniente de una muestra sin filtrar y acidificada (para disolver el manganeso que puede haber precipitado en la muestra de agua), y
- Manganeso soluble, proveniente de una muestra filtrada (filtro microbiológico de 0.45 micrones) y luego acidificada.

A.2.2 Resultados Obtenidos en la Determinación de Manganeso

Los resultados del análisis de manganeso se reportan en la tabla 6.4.

TABLA 6.4
 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANALISIS DE MANGANESO PARA LOS
 DIFERENTES LUGARES MUESTREADOS

L U G A R	Mn Total		Mn Soluble		Mn Insoluble.	
	Cm(ppm)	CV(%)	Cm(ppm)	CV(%)	Cm(ppm)	CV(%)
Colonia Sel-Sutt	0.245	5.8	0.245	5.8	0.00	5.8
Reparto San Bartolo	1.23	3.4	0.93	0.0	0.30	1.7
Colonia El Pepeto	0.44	3.2	0.36	0.0	0.08	1.6
Fábrica Eureka	0.60	4.7	0.45	3.1	0.15	3.9
Hogar Divina Providencia	0.80	2.6	0.26	5.4	0.54	4.0
San Juan Opico	0.53	4.0	0.41	3.4	0.12	3.7
Guluchapa	1.25	2.1	0.98	2.3	0.27	1.8

Nota: Cm, concentración promedio de dos repeticiones.
 CV(%), coeficiente de variación de las repeticiones.

A.3 Análisis Bacteriológicos

Justificación: Los análisis bacteriológicos tienen como objetivo calificar la calidad sanitaria del agua y su adaptabilidad a usos generales. Lo ideal es que el agua de bebida no contenga ningún microorganismo patógeno para evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales e infectocontagiosas (31).

A.3.1 Análisis Bacteriológicos Realizados a las Muestras de Agua

Los procedimientos existentes para determinar la presencia de bacterias patógenas no son aceptables en un programa de muestreo rutinario, por lo que su presencia se determina mediante asociación con un microorganismo indicador. El indicador universalmente empleado es el grupo de organismos coliformes y específicamente los coliformes fecales.

Al verificarse la presencia de coliformes fecales se constata la contaminación del agua con desechos humanos o animales y por lo tanto, el riesgo potencial de enfermedades de origen viral y bacterial.

En las muestras de agua colectadas el método utilizado para indicar la calidad sanitaria del agua es la determinación de bacterias del grupo coliforme.

DETERMINACION DE BACTERIAS DEL GRUPO COLIFORME

El propósito de esta prueba es la estimación del número de bacterias del grupo coliforme, presentes en un determinado volumen de agua. Su presencia será un índice de la intensidad de una contaminación.

Los coliformes son bacterias capaces de fermentar la lactosa con producción de gas, por lo que cual

quier prueba de fermentación de caldo lactosado que muestre formación de gas después de 24 ó 48 horas de incubación a $35 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ indica la presencia de bacterias del grupo coliforme.

Si se conoce el número de tubos positivos (tubos con formación de gas) y negativos (tubos sin formación de gas) es posible hacer una estimación semicuantitativa del número de bacterias coliformes presentes. Esto proporciona un índice de contaminación que se expresa como el "Número Más Probable" (NMP) de bacterias coliformes por 100 ml de muestra.

Los índices de contaminación en función del número de tubos positivos se presentan en la tabla 6.5

TABLA 6.5

INDICE DEL NUMERO MAS PROBABLE DE BACTERIAS COLIFORMES (32)

Nº tubos positivos/ 10 ml muestra	NMP/100 ml de agua
0	Menor de 2.2
1	2.2
2	5.1
3	9.2
4	16
5	Mayor de 16

Esta determinación incluye dos fases:

- Prueba presuntiva, es aquella que manifiesta fermentación de lactosa con producción de gas. La ausencia de gas se interpreta como el resultado del examen de una muestra exenta de coliformes. La presencia de gas es una posibilidad de presunción, pero no de seguridad puesto que otras bacterias pueden producir gas. En consecuencia se necesita un ensayo posterior (32).
- La prueba confirmada consiste en la demostración de coliformes verdaderos que al crecer sobre medios selectivos eliminan los resultados dudosos de la prueba presuntiva. El medio utilizado es bilis verde brillante. El procedimiento se detalla en el Anexo A, y en la tabla 6.6 se presentan los resultados de las pruebas bacteriológicas.

B. Análisis Secundarios

B.1 pH

Justificación: El pH es un factor altamente influyente en la cinética de las reacciones químicas. Para el caso específico del hierro a valores de pH de 6.5 la reacción de oxigenación es lenta, sin embargo,

TABLA 6.6
 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS BACTERIOLÓGICAS AL INOCULAR
 10 ml DE AGUA DE LOS POZOS ANALIZADOS

Lugar	Prueba Presuntiva (48 h) *	Prueba Confirmativa (48 h) *	Bacterias Coliformes Totales NMP/100 ml	Caracterización del agua **
Colonia Sel-Sutt	1/5	1/1	2.2	Contaminada
Reparto San Bartolo	1/5	1/1	2.2	Contaminada
Colonia El Pepeto	5/5	5/5	Mayor 16	Contaminada
Fábrica Eureka	0/5	---	---	No contaminada
Hogar Divina Providencia	5/5	5/5	Mayor 16	Contaminada
San Juan Opico	5/5	2/5	5.1	Contaminada
Guluchapa	5/5	2/5	5.1	Contaminada

* En estas columnas se indica el número de tubos positivos.

** Clasificación basada en los límites de la Organización Mundial para la Salud (OMS) para agua potable.

incrementos en una unidad de pH aumenta cien veces la velocidad de reacción de los iones ferrosos. Respecto al manganeso la reacción es mucho más lenta y requiere pH mayor de 8.0, (17).

Por otro lado el pH interactúa también con los iones bicarbonato y con el potencial de oxidación-reducción, favoreciendo la remoción de ambos iones a través de la oxigenación del agua.

Además el valor del pH permite tipificar un agua, los valores ácidos están generalmente asociados con aguas con alto contenido de CO_2 libre y/o ácidos húmicos y los valores mayores de 7.0 indican aguas con elevado contenido de bicarbonatos (30).

B.1.1. Método de Determinación del pH

La concentración de los iones hidrógeno o valor del pH, mide la intensidad de la reacción ácida o alcalina del agua.

El pH es el logaritmo de la recíproca de la concentración del ión hidrógeno, o más precisamente, de la actividad del ión hidrógeno, en moles por litro.

La medición del pH se realizó electrométricamente, con un medidor de pH marca ORION RESEARCH, que utiliza un electrodo combinado.

Los resultados de la medición del pH de las muestras de agua de los diferentes lugares se presentan en la tabla 6.7.

B.2 Alcalinidad

Justificación: La importancia de esta determinación se debe al hecho de que tanto el hierro como el manganeso, en las aguas naturales se encuentran generalmente en forma de bicarbonatos, en ausencia de oxígeno. Y puesto que la alcalinidad es una medida de los bicarbonatos, carbonatos o hidróxidos se puede presumir que su valor es un índice probable del contenido y forma en que ambos metales se hallan presentes en la muestra.

Por otro lado cabe la posibilidad que durante la oxidación, si hay CO_2 , éste al liberarse modifique el valor de la alcalinidad, disminuyendo su contenido inicial, además de alterar el pH del agua durante el tratamiento, lo cual afectaría la solubilidad de los carbonatos ferrosos y manganosos que pudieran encontrarse en ese momento (la solubilidad de los carbonatos es baja a pH superior de 8.5).

B.2.1 Procedimiento de Determinación de la Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de los componentes alcalinos del agua. La determinación se hace por ti-

titulación con una solución valorada de un ácido mineral fuerte a los puntos sucesivos de equivalencia del carbonato y bicarbonato por medio de indicadores. En este caso se utilizaron indicadores de fenolftaleína y anaranjado de metilo.

Los resultados del análisis de alcalinidad se reportan en la tabla 6.7.

B.3 Acido Sulfhídrico

Justificación: La presencia de H_2S indica que probablemente ha ocurrido una descomposición de materia orgánica, que generalmente proviene de la reducción bacteriana de los sulfatos. El azufre así presente puede formar complejos inorgánicos con el Fe y Mn que incrementan la solubilidad de estos metales, requiriéndose elevados valores de pH y dosis altas de oxidantes químicos para una remoción efectiva (33).

B.3.1 Procedimiento de Determinación de Acido Sulfhídrico

Los compuestos de yodo en una solución ácida reaccionan con el H_2S oxidándolo a sulfuro (S_0). Una titulación basada en esta reacción es un método exacto para determinar sulfhídrico en concentraciones arriba de 1 ppm, si no hay interferentes y las pérdidas de H_2S son nulas.



La determinación se realizará por titulación, utilizando yoduro-yodato como agente titulante y almidón soluble en medio ácido como indicador.

Los resultados del análisis de H_2S se presentan en la tabla 6.7.

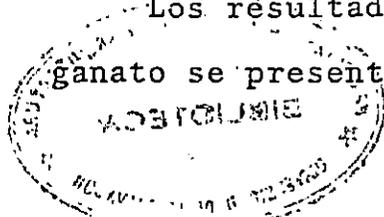
B.4 Materia Orgánica

Justificación: La materia orgánica es un factor determinante en la factibilidad de remoción tanto del Fe como del Mn, ya que debido a su interacción con estos iones metálicos se generan complejos de difícil o imposible eliminación. Se corre el riesgo de que el hierro férrico permanezca en solución debido a su quelación con material orgánico, que no pueda ser oxidado en el aireador ni retenido en el lecho de lava volcánica, de aquí la importancia de establecer su existencia en el agua de trabajo.

B.4.1 Procedimiento de Determinación de Materia Orgánica

El análisis se basa en la determinación volumétrica de la demanda de permanganato de potasio, acidificando la muestra, tratándola en caliente con una solución de $KMnO_4$ y titulando el exceso con oxalato de sodio.

Los resultados obtenidos de la demanda de permanganato se presenta en la tabla 6.7.



6.3.2 Resumen de los Resultados Obtenidos en los Análisis Realizados

Los resultados obtenidos en los análisis físicoquímicos y bacteriológicos del agua de los diferentes lugares muestreados, se presentan en la tabla 6.7.

TABLA 6.7

RESUMEN DE LOS ANALISIS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS DE LOS DIFERENTES LUGARES MUESTREADOS

LUGAR DE MUESTREO	A N A L I S I S												
	P R I M A R I O S									S E C U N D A R I O S			
	HIERRO (ppm)				MANGANESO (ppm)			BACTERIOLOGICOS		pH	H ₂ S (ppm)	Alcalinidad (ppm CaCO ₃)	Mat. Orgánica (ppm KMnO ₄)
	Total	Soluble	Insoluble	Complejo	Total	Soluble	Insoluble	Coliformes Totales NMP/100 ml	Caracterizaciones del agua				
Col.Sel-Sutt	0.55	0.24	0.31	0.13	0.24	0.24	0.00	2.2	C	7.2	6.50	224	5.7
Reparto San Bartolo	0.39	0.21	0.18	0.30	1.23	0.93	0.30	2.2	C	7.4	5.50	180	4.8
Colonia El Pepeto	0.27	ND	0.27	0.12	0.44	0.36	0.08	Mayor de 16	C	7.3	5.70	213	6.7
Fábrica Eureka	0.66	0.49	0.17	0.10	0.6	0.45	0.15	Menor de 22	NC	7.5	4.20	208	7.2
Hogar Divina Providencia	1.63	ND	1.63	0.24	0.8	0.26	0.54	Mayor de 16	C	6.9	5.20	134	5.4
San Juan Opico	1.97	0.56	1.39	0.45	0.53	0.41	0.12	5.1	C	7.1	5.70	153	5.8
Guluchapa	1.15	1.01	0.14	0.27	1.25	0.98	0.27	5.1	C	6.7	2.49	135	9.1

ND: No detectable por el método utilizado.

NC: No contaminada.

C: Contaminada.

VII. DISEÑO EXPERIMENTAL DE ANALISIS POR REGRESION

El objetivo principal del Diseño Experimental de Análisis por Regresión es desarrollar ecuaciones o modelos matemáticos de pronóstico que describan un proceso particular. Esto se logra a través del estudio del efecto de una serie de variables independientes previamente definidas que se consideran determinantes sobre el proceso diseñado, las cuales son evaluadas estadísticamente al final del experimento (28).

Los pasos fundamentales se resumen a continuación (28):

1. Listar todas las posibles variables influyentes sobre el proceso.
2. Determinar las variables controlables por el experimentador (variables independientes o variables factor) y las no controlables (variables fijas), estas últimas incluyen:
 - a. Las que no se modifican por el desarrollo del experimento.
 - b. Las que son dependientes de las variables factor y
 - c. Las que son determinadas por decisión personal.
3. Definir la variable respuesta.
4. Definir cada uno de los niveles de las variables independientes establecidas.

5. Definir el arreglo del experimento a realizar, utilizando el modelo de tamizado de variables de Plackett-Burman para determinar el número de corridas experimentales en función del número de variables independientes establecidas.
6. Una vez realizado el experimento, evaluar el efecto de todas las variables independientes por análisis de regresión, estableciendo un modelo matemático que relacione los rendimientos de remoción de hierro y manganeso con el efecto de cada una de las variables independientes en forma separada e interactivamente.

La validez o confianza del modelo matemático o regresión se evalúa a través de las siguientes pruebas estadísticas:

1. Coeficiente correlación (r)
2. Distribución F o de Fisher
3. Sumatoria de las desviaciones (D)
4. Nivel de significancia mínimo (P)

7.1 DESCRIPCION DE LAS VARIABLES DE DISEÑO

7.1.1 Diagrama del sistema en estudio

El sistema en estudio para la remoción de hierro y manganeso básicamente consiste en dos procesos unitarios: aireación por difusión y filtración oxidativa a presión (ver figura 7.1).

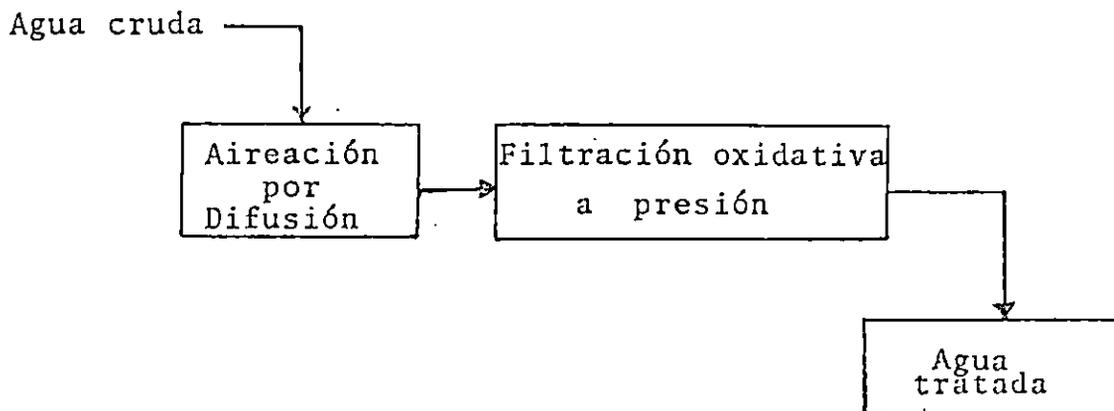


Fig.7.1 Diagrama de flujo del sistema en estudio para la remoción de hierro y manganeso.

El diseño experimental de Análisis por Regresión se realiza para cada una de estas operaciones con los siguientes propósitos:

1. Determinar el efecto de las variables independientes del aireador sobre la reacción de oxidación del hierro soluble.
2. Determinar el efecto de las variables independientes del filtro sobre la retención de óxidos e hidróxidos férricos y mangánicos y la posible autocatálisis de éstos sobre los iones manganosos.
3. Determinar las condiciones óptimas de operación tanto del aireador como del filtro.

Las variables consideradas influyentes en el sistema en estudio (aireación y filtración), así como su clasificación y subclasificación se presentan en la tabla 7.1.

Dentro de la clasificación, a las variables de mayor efecto y factibles de manejar durante la experimentación se les ha denominado variables independientes y al resto, variables fijas o no controlables por el experimentador; las cuales, también son subclasificadas en 3 categorías.

TABLA 7.1

CLASIFICACION Y SUBCLASIFICACION DE LAS VARIABLES
INFLUYENTES EN EL SISTEMA DE REMOCION DE
HIERRO Y MANGANESO

CLASIFICACION	SUB-CLASIFICACION	AIREADOR	F I L T R O
Variables Independientes		Altura de agua	Tamaño de partículas del lecho filtrante
		Diámetro de orificio	Altura de lecho filtrante
		Tiempo de aireación	Flujo de agua
		Tiempo de reacción por sedimentación	Cloración
Variables Fijas	No se modifican por la experimentación	Temperatura	Temperatura
		pH	pH
	Dependientes de las variables independientes	Presión	Presión
		Agitación y turbulencia	Tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad
	Determinadas por decisión personal	Flujo de aire	Tipo de medio filtrante
		Diámetro del tanque	Diámetro del filtro
Distancia y arreglo entre los orificios del difusor			

En las siguientes secciones se describe el efecto de cada una de las variables independientes y fijas, tanto para el aireador como para el filtro.

7.1.2 Variables Independientes

A. En el Aireador

1) Altura de Agua

La generación de una mayor altura de agua permite un tiempo de contacto mucho mayor entre la formación de la burbuja y su disipación final en la superficie del líquido, haciendo así más eficiente la aireación (31).

2) Diámetro de Orificio del Distribuidor de Aire

El diámetro del orificio a través del cual escapan las burbujas de aire al agua determina la forma y tamaño de burbujas (34,35).

Webb (1959), reporta que orificios con diámetros de 0.4 mm producen burbujas realmente esféricas, orificios con diámetros de 4 mm producen burbujas que poco después de desprenderse del orificio adoptan una forma elipsoidal y muestran un recorrido en zig-zag o helicoidal y orificios con diámetros mayores de 6 mm producen burbujas que toman eventualmente la forma de hongo con un recorrido zigzagueante o helicoidal mayor que el anterior (37).

La formación de burbujas pequeñas producen una mayor área interfacial por unidad de volumen (A/V) y formación de burbujas grandes aumentan el mezclado en el tanque, aumentando así la magnitud del coeficiente de película líquida (K_L) (36).

Tanto la generación de una mayor área interfacial (A/V), como el aumento de la magnitud del coeficiente de película líquida (K_L), favorecen la transferencia o velocidad de absorción de oxígeno (36).

3) Tiempo de Aireación

Entre más tiempo permanezca el aire en contacto con el agua, mayor cantidad de oxígeno puede ser absorbido hasta que se alcance el equilibrio (35).

Para un compresor con un flujo de aire dado, al aumentar el tiempo de aireación, se aumenta la cantidad de aire proporcionado al agua.

4) Tiempo de Reacción y Sedimentación

A mayor tiempo de reacción y sedimentación se tiene: mayor tiempo de reacción, mayor formación de precipitados de óxido e hidróxido férrico y mangánicos, favoreciéndose la agregación y formación de flóculos (28).

B. En el Filtro

1) Tamaño de Partícula del Lecho Filtrante

Del tamaño de partícula del lecho filtrante depende la eficiencia de filtración, período de trabajo del filtro entre lavado y lavado (duración de la carrera de filtración), tiempo de agotamiento y facilidad de lavado (6,38).

Lechos filtrantes con partículas cuyo tamaño tiende a fino, aunque filtran con más eficiencia se ensucian más rápidamente por lo que se hace necesario lavarlos con más frecuencia y demandan un mayor gasto de agua. Además estos lechos se caracterizan por oponer resistencia de rozamiento, producir bajas velocidades de filtración, presentar carreras de filtración más cortas y por ser más difícil mantenerlos limpios y en buen estado (libres de bolas y zonas de atasco) (39,40).

2) Altura del Lecho Filtrante

La altura del lecho filtrante es una variable que tiene gran influencia en la eficiencia de la filtración. Al inicio de la filtración, cuando el medio filtrante está limpio, cualquier altura de lecho presenta la misma eficiencia de remoción. Con el tiempo de operación del filtro se produce un aumento del depósito específico que provoca una colmatación progresiva de los poros a través de la altura del lecho filtrante, lo cual disminuye la eficiencia de remoción de partículas suspendidas (40).

De lo anterior puede decirse que a mayor altura de lecho filtrante se tiene mayor área o superficie de exposición para retener partículas suspendidas, aumentando así la eficiencia de filtración (41).

Otro efecto es que un tramo amplio opone mayor resistencia al paso del agua, con lo cual se provoca una disminución en la velocidad de filtración (41).

Existen además otras características relacionadas con esta variable (17,40).

1. Tiempo de agotamiento del material filtrante;
2. Período de trabajo del filtro entre lavado y lavado;
3. Facilidad de lavado y retrolavado
4. Demanda de agua usada en el retrolavado y lavado.

3) Flujo de Agua

Del flujo de agua alimentado al filtro, dependen el período de trabajo del filtro entre lavado y lavado y la velocidad de filtración (39,40).

4) Cloración

La adición de cloro al agua después de la aireación logra la potabilidad del agua y favorece la formación de precipitados de hierro y manganeso por oxidación, aumentando así la eficiencia de la operación de filtrado (17,22).

7.1.3 Variables Fijas

A. En el Aireador

1) Temperatura

La temperatura afecta la solubilidad de los gases. A mayor temperatura la solubilidad de los gases en el agua disminuye (17,31).

En este trabajo, se asume que la velocidad de absorción de oxígeno (solubilidad), es aproximadamente constante ya que se considera que las variaciones de temperatura durante un proceso de aireación por difusión son pequeñas.

2) pH del Agua

El pH de las agua varía con las estaciones y de un lugar a otro. Es una variable de la cual depende fuertemente la velocidad de la reacción de oxigenación (17).

El pH es una variable que puede sufrir modificaciones durante el transcurso de la aireación, dependiendo de las características del agua. Si el agua de trabajo tiene un pH aproximadamente neutro de 6.5 a 7.5 (rango de pH en el cual se encuentran las agua subterráneas de El Salvador), las reacciones de oxigenación van acompañadas de una reducción del pH (17).

Si el agua de trabajo tiene alto contenido de dióxido de carbono, se favorece la oxidación de los iones ferrosos y manganosos ya que durante la aireación el CO_2 se libera

provocando un incremento de pH (17).

3) Presión

La presión afecta la solubilidad del aire en el agua en forma directamente proporcional. A mayor presión, mayor solubilidad o absorción de oxígeno presente en el aire (17, 31). El equipo de aireación seleccionado es abierto a la atmósfera y el aire es introducido a profundidad debajo de la superficie del líquido, por lo que, en esta operación unitaria se ejerce el efecto de dos presiones: la atmosférica y la que ejerce la columna de líquido, lo cual favorece la solubilidad del gas.

La presión que ejerce la columna de líquido, disminuye la velocidad de ascenso de las burbujas a la superficie del líquido aumentando así el tiempo de contacto aire-agua (42).

Considerando lo anterior y que en el aireador la presión atmosférica es constante, esta variable se ha considerado dependiente o directamente relacionada con la variable independiente: altura de agua.

4) Agitación y Turbulencia

Estas dos operaciones ayudan a dispersar efectivamente el gas en el líquido, ya sea por el rompimiento o colapso de las burbujas aumentando de esta manera la transferencia de oxígeno (31,34).

La agitación y turbulencia que se provee al sistema de aireación seleccionado es únicamente la generada por el tamaño de burbujas a flujo constante.

5) Flujo de Aire

Del flujo de aire dependen el tamaño y la velocidad de las burbujas que ascienden en el tanque de aireación. Cuando la velocidad de flujo es baja, el tamaño de las burbujas es directamente proporcional al diámetro del orificio en el cual la burbuja ha sido formada (34,35).

Incrementos en el flujo de aire disminuyen el tamaño de las burbujas, las vuelve no uniformes, aumenta la velocidad de movimiento hacia arriba y provoca turbulencia, tanto en la superficie como en el seno del líquido. El resultado, es un tiempo menor de residencia de aire y creación de burbujas con menor superficie de transferencia (34, 35).

6) Diámetro del Tanque

De esta variable depende el tipo de burbujeador localizado en el fondo del tanque para asegurar una aireación eficiente. Para diámetros grandes se hace necesario uno o varios tubos con orificios múltiples, no así para diámetros pequeños con los cuales basta un simple tubo abierto (34).

7) Distancia entre los Orificios

La separación entre los orificios del distribuidor de

aire influye en la distribución de las burbujas de aire a la superficie del líquido y determina el número de orificios en éste (34,42).

Separaciones pequeñas entre orificios del distribuidor de aire pueden provocar coalescencia de burbujas adyacentes. Separaciones grandes pueden provocar zonas muertas (42).

B. En el Filtro

1) Temperatura

Este factor influye en la viscosidad, incrementos en la temperatura disminuyen la viscosidad del agua cruda y en consecuencia incrementan la velocidad de filtración (43).

Disminuciones de temperatura aumentan la viscosidad del agua provocando un incremento en la caída de presión a través del filtro durante la operación (43).

En general aumentos de temperatura conducen a eficiencia mayores de filtración pues hay un incremento en la energía termodinámica de las partículas en el agua (41).

En este trabajo se considera que las variaciones de temperatura durante el paso del agua a través del filtro son despreciables, por lo que se asume que su efecto sobre la viscosidad, caída de presión y energía termodinámica no es significativo.

2) pH del Agua

El pH es un factor que afecta directamente la cinética de las reacciones químicas. Los rangos de pH ideales para filtros de oxidación varían dependiendo del tipo de compuesto. Respecto a los del hierro y manganeso el pH más favorable es el que se halla en el rango de 6.5-9.5 aproximadamente, según lo indica la tabla 7.2 (43)

TABLA 7.2

RANGOS DE pH IDEALES PARA LA OXIDACION DE COMPUESTOS FERROSOS Y MANGANOSOS (43)

COMPUESTO A SER OXIDADO	RANGO DE pH MAS FAVORABLE
Fe^{+2}	6.5 - 7.5
Mn^{+2}	8.0 - 9.5
H_2S como S^{-2}	8.5 - 10.0

En este estudio, se considera que las variaciones de pH generadas durante la aireación no afectan significativamente el proceso de filtración oxidativa.

3) Presión

Los incrementos de presión provocan aumentos casi proporcionales de caída de presión (pérdida de carga, 41).

En el proceso de filtración, variaciones de presión serán generadas por cambios en la altura y tamaño de partículas de lecho filtrante, regulación de válvulas de globo y

por las partículas que se depositan sobre el lecho filtrante (6,17,44).

Lechos filtrantes con tamaño de partículas gruesas disminuyen la caída de presión e incrementos en la altura de lecho filtrante prolongan el tiempo de elevación de la caída de presión alargando el período de trabajo del filtro (17,44).

Al inicio del proceso de filtración la caída de presión es mínima, la cual es originada por el paso del agua a través del filtro, sistema de drenaje, tuberías, accesorios y válvulas, a medida el tiempo transcurre la caída de presión comienza a aumentar debido a las partículas que se depositan sobre el lecho filtrante (6).

4) Tamaño Efectivo y Coeficiente de Uniformidad

Estas variables dependen de la variable independiente tamaño de partículas, por lo que influyen de igual manera que ésta. Son características que especifican el medio filtrante (40). A continuación se definen cada uno de estos términos.

Tamaño Efectivo

Medida del tamaño promedio de las partículas que componen un cuerpo sólido. Se determina por un ensayo granulométrico, que tiene como finalidad conocer los tamaños de los distintos granos que componen el lecho filtrante (lava

volcánica) y el porcentaje que en cada uno de ellos está presente (45). Es el diámetro del tamiz que deja pasar un 10% del peso total de la muestra (45).

Coeficiente de Uniformidad

Propiedad de flujo usada para medir el grado de cohesión de las partículas (tendencia a reunirse o adherirse de las partículas entre sí, 46). Es determinado por el análisis de tamizado del material; y es el valor numérico obtenido al dividir el ancho de la abertura por el que pasa el 60% de la muestra entre el ancho de la abertura por el que pasa el 10% de la muestra (46).

5) Tipo de Medio Filtrante

El tipo de medio filtrante influye en la duración de la carrera de filtración y en la facilidad de lavado (40).

Un medio filtrante ideal es aquél que a una determinada granulometría y granos de cierto tamaño efectivo, requiere una cantidad mínima de agua para ser lavado eficientemente y es capaz de remover la mayor cantidad de partículas suspendidas (38).

En este trabajo, el medio filtrante está constituido por lava o piedra volcánica, la cual en estudios anteriores se demostró que posee gran capacidad de remoción de só-

lidos suspendidos en soluciones acuosas (47). No se reporta nada acerca de la cantidad de agua necesaria para efectuar un lavado eficiente, aunque se espera que ésta sea mínima.

6) Diámetro del Filtro

Esta variable está íntimamente ligada con la velocidad o tasa de filtración e influye en criterios estructurales (tamaño de tuberías, tipo de válvulas, tipo de sistema de distribución de agua) y operativos (45,48).

7.1.4 Variable Respuesta

La variable respuesta, son los datos cuantitativos de la corrida experimental (49). Se expresa como un porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro o de manganeso, según las consideraciones tomadas en base a las características propias de cada una de las operaciones (aireación y filtración) del proceso diseñado.

A. En el Aireador

Aunque se reconoce que el proceso de aireación es más eficiente sobre el hierro que sobre el manganeso, se investiga la cantidad de ambos elementos oxidados en este proceso. Razón por la cual la variable respuesta se expresa como porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro o manganeso por medio de la oxidación. Se calcula con la ecuación 7.1.

$$\% \text{ de rendimiento} = \frac{C_{os} - C_{fs}}{C_{os}} \times 100 \quad (7.1)$$

Donde:

C_{os} : Concentración inicial total de hierro y manganeso, asumiendo que ambos están completamente solubles dentro del pozo de donde se extrajo la muestra.

C_{fs} : Concentración de Fe o Mn solubles al final de la aireación.

$C_{os} - C_{fs}$: Concentración de hierro y manganeso que ha sido oxidado.

B. En el Filtro

Interesa conocer la cantidad de hierro o de manganeso oxidados y/o retenidos por medio del lecho de lava volcánica, por lo que la variable respuesta se expresa como porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro o manganeso durante la filtración, calculándose con la ecuación 7.2.

$$\% \text{ de rendimiento} = \frac{C_{ot} - C_{ft}}{C_{ot}} \times 100 \quad (7.2)$$

Donde:

C_{ot} : Concentración total de hierro o manganeso después de la aireación.

C_{ft} : Concentración total de hierro o manganeso después de la filtración.

$C_{ot} - C_{ft}$: Concentración de hierro o manganeso oxidados y/o retenidos durante la filtración.

7.2 SELECCION DE LOS NIVELES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES

La selección de los niveles o magnitudes que toma la variable independiente a evaluar, se ha hecho tomando en consideración: criterios reportados en fuentes bibliográficas consultadas, ensayos de laboratorio, pruebas de familiarización, cálculos y accesibilidad de equipo.

Se han escogido dos niveles de trabajo uno positivo (valor más alto) y otro negativo (valor más bajo) para cada una de las variables independientes detalladas anteriormente.

7.2.1 Justificación de los Niveles Escogidos

A. En el Aireador

En la Tabla 7.3 se presenta el resumen del tipo de variable independiente y sus respectivos niveles.

TABLA 7.3
TIPO Y NIVELES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES PARA EL AIREADOR

VARIABLES	TIPO	N I V E _ L E S	
		(+)	(-)
X_1 : Tiempo de aireación	Continua	30 min	15 min
X_2 : Diámetro de orificio	Continua	4.2 mm	2.4 mm
X_3 : Altura de agua	Continua	60.84 cm	48.67 cm
X_4 : Tiempo de reacción y sedimentación	Continua	45 min	15 min

La selección de los niveles para la variable tiempo de aireación se realizó de manera práctica, teniendo en consideración los resultados obtenidos en cálculos matemáticos y pruebas experimentales de familiarización; los cuales se resumen a continuación.

1. El tiempo de aireación requerido para oxidar estequiométricamente el Fe^{+2} y Mn^{+2} presentes en muestras de aguas con altos contenidos de estos elementos, más un exceso del 70%, es bastante pequeña (de escasos segundos), aún utilizando compresores de baja capacidad.
2. Tiempos pequeños de aireación producen bajos porcentajes de oxidación. Para el caso, el mayor porcentaje de oxidación de hierro soluble, obtenido en pruebas de familiarización en las cuales se proporcionó tiempos de aireación de 5 y 10 min, fue del 76%.

Los tiempos de aireación seleccionados como niveles positivo y negativo fueron 30 y 15 min respectivamente. Tiempos que aunque corresponden a grandes excesos de oxígeno suministrado (con respecto a la estequiometría de las reacciones) favorecen la oxidación del Fe y Mn y además remueven gases indeseables y olores y sabores desagradables.

Es importante mencionar que los niveles seleccionados se encuentran dentro del rango de los tiempos recomendados en los procesos de aireación por difusión. (39).

Para el diámetro del orificio del distribuidor de aire, la selección de niveles se hizo en función de la disponibilidad de brocas de acero inoxidable comerciales, tratando de favorecer la solubilidad del oxígeno en el agua por la generación de una mayor área interfacial por unidad de volumen y/o un aumento en el mezclado o agitación del sistema (ver sección 7.1.2 literal A numeral 2).

Con el nivel más bajo (-), 2.4 mm, se pretende generar una gran cantidad de burbujas esféricas, con el objetivo de incrementar el área interfacial por unidad de volumen (A/V), y con el nivel más alto (+), 4.2 mm, se persigue aumentar la magnitud del coeficiente de película líquida (K_L) por medio de la agitación o mezclado, que provee al sistema de aireación. las burbujas originadas en este tamaño de orificio.

Los niveles 60.84 cm y 48.67 cm de la variable altura de agua, corresponden a volúmenes de agua de 25 y 20 galones respectivamente. Estos niveles fueron seleccionados en base a la capacidad del recipiente disponible.

Los niveles de la variable tiempo de reacción y sedimentación se determinaron experimentalmente mediante la prueba de sedimentación que consistió en airear un volumen de agua de 20 galones durante 10 minutos y determinar la concentración de hierro soluble cada 15 minutos de reposo durante 2 horas. Los resultados obtenidos se muestran en

la figura 7.2. En el anexo B se detalla el procedimiento seguido para esta prueba.

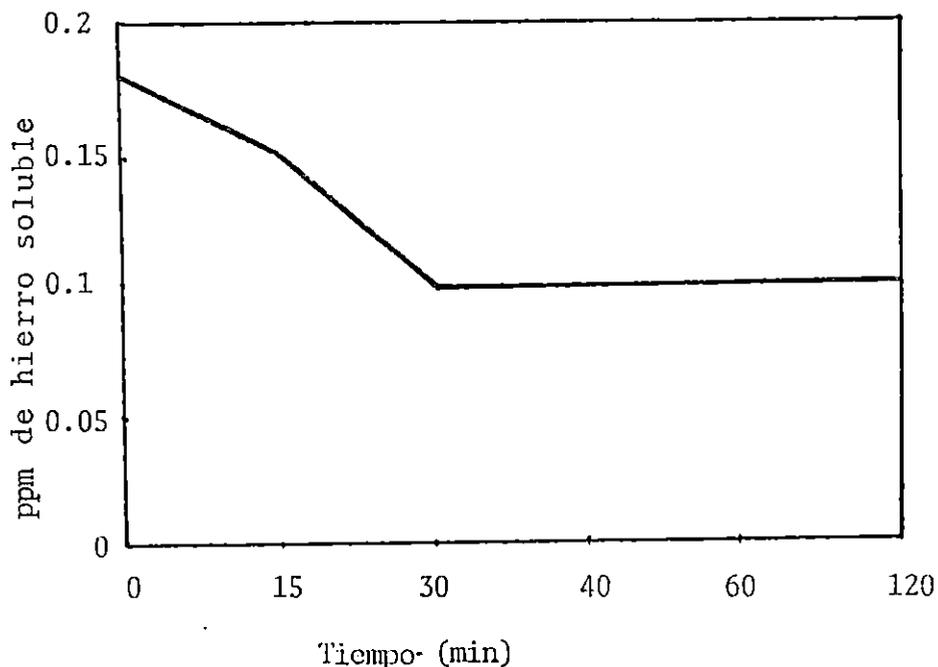


Fig.7.2 Prueba de sedimentación del hierro soluble.

De la figura 7.2 se observa que a los 15 minutos se inició una precipitación apreciable que se estabilizó a los 30 minutos. Sin embargo se consideró que el margen entre estos dos tiempos es muy corto, por lo que los niveles seleccionados fueron de 15 y 45 minutos, nivel mínimo y máximo, respectivamente.

B. En el Filtro

El tipo de variable y los niveles alto y bajo se reportan en la tabla 7.4:

TABLA 7.4
TIPO Y NIVELES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES PARA EL FILTRO

VARIABLE	TIEMPO	N I V E L E S	
		(+)	(-)
X ₁ : Tamaño de partícula	Continua	1.18 mm	0.6 mm
X ₂ : Altura de lecho	Continua	80 cm	40 cm
X ₃ : Flujo de agua	Continua	1.4 gal/min	0.7 gal/min
X ₄ : Cloración	Continua	1 g	0 g

La selección de los niveles de la variable tamaño de partícula se realizó tomando en consideración los rangos de tamaños de partículas recomendadas para la remoción de hierro, manganeso y ácido sulfhídrico en diferentes tipos de filtros comerciales, los cuales se muestran en la tabla 7.5.

TABLA 7.5
RANGO DE TAMAÑOS EFECTIVOS PARA LA ELIMINACION POR FILTRACION DE HIERRO, MANGANESO Y ACIDO SULFIDRICO CON FILTROS COMERCIALES (43)

FILTROS COMERCIALES	RANGO DE TAMAÑO EFECTIVO
BIRM	0.6 - 1.2 mm
FILTER Ag	0.57 - 0.6 mm
GREENSAND	0.3 - 0.35 mm

En el anexo E se muestra la metodología para la determinación del tamaño efectivo de partículas de lava.

Los niveles para la variable altura de lecho filtrante se seleccionaron tomando en cuenta las especificaciones para filtros rápidos a gravedad y presión, reportados en diferentes fuentes bibliográficas.

En la tabla 7.6, se muestran especificaciones de altura de lecho filtrante recomendadas por la literatura.

Los niveles de la variable flujo de agua se determinaron en pruebas de familiarización con el filtro mediante la manipulación de las válvulas de globo ubicadas a la salida y entrada del filtro. Su selección consistió en determinar, para cada caso específico (combinación de niveles de las variables independientes: altura de lecho filtrante y tamaño de partículas de lecho filtrante), qué regulación de las válvulas permite obtener el mismo flujo a la salida del filtro, además de una adecuada operación de éste, ya que altas regulaciones de las válvulas de globo producen incrementos de presión que provocan fugas en las partes más débiles del filtro.

TABLA 7.6
ESPECIFICACIONES DE ALTURA DE LECHOS FILTRANTES PARA
FILTROS RAPIDOS (31,45)

FILTROS RAPIDOS	ALTURA DE LECHO FILTRANTE
Filtros a gravedad	0.4 - 0.9 m
Filtros a presión	0.6 - 0.9 m

El nivel más alto de la variable cloración se determinó experimentalmente en el lugar de trabajo, adicionando diferentes cantidades conocidas de hipoclorito de calcio a muestras de un galón del agua en estudio (Guluchapa), previamente aireadas y determinando el cloro residual después de 20 min de contacto y agitación.

El cloro residual fue determinado mediante el método DPD (n-n Dietil-Para-Fenileno-diamina) usando un estuche de prueba. Se escogió este método ya que elimina la interferencia de Fe y Mn (50,51).

Con el objetivo de asegurar una desinfección completa, la cantidad de hipoclorito de calcio al 65% seleccionada como nivel más alto, fue aquella a la cual se logró una concentración de cloro residual de 1 ppm.

La cantidad de hipoclorito de calcio al 65% adicionada por corrida (20 gal), fue de 1 gramo, que equivale a una concentración de cloro libre de 8.6 ppm y a una demanda de cloro de 7.6 ppm.

La determinación en el lugar de trabajo para la demanda de cloro se presenta en el anexo B.

7.3 ESTABLECIMIENTO DEL ORDEN Y TRATAMIENTO DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES

Para realizar la parte experimental de manera sistemática, se ha utilizado la información que presenta el cuadro

de trabajo del diseño experimental de Plackett-Burmann (49) con respecto al orden y tratamiento de las muestras.

De este cuadro se extrajo la combinación de niveles para cuatro variables independientes en doce corridas establecidas, resultando un ordenamiento como el que aparece en la tabla 7.7.

TABLA 7.7

CUADRO DE TRABAJO QUE ESTABLECE EL ORDEN, REALIZACION Y LAS REPETICIONES DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES PARA LAS DOS ETAPAS EXPERIMENTALES (AIREACION Y FILTRACION)

CORRIDA	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂	Y	CV (%)
1	+	+	-	+				
2	+	-	+	+				
3	-	+	+	+				
4	+	+	+	-				
5	+	+	-	-				
6	+	-	-	-				
7	-	-	-	+				
8	-	-	+	-				
9	-	+	-	+				
10	+	-	+	+				
11	-	+	+	-				
12	-	-	-	-				

Donde:

X₁, X₂, X₃ y X₄ : Variables independientes

Y₁ y Y₂ : Valores de variable respuesta cada corrida por duplicado.

Y : Valor promedio de la variable respuesta por cada corrida y se calcula así:

$$Y = \frac{Y_1 + Y_2}{2} \quad (7.3)$$

CV (%) : Coeficiente de variación expresado como porcentaje.

El coeficiente de variación es útil para cuantificar la dispersión de los datos de cada corrida, es una comparación entre Y_1 y Y_2 (65).

7.4 TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS DATOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

En la experimentación de cualquier ciencia se enfrentan problemas a diario, estos consisten en la relación de las variables involucradas, resultando por ello algunas dudas y para responderlas se establecen relaciones entre la variable dependiente o respuesta y las variables independientes hasta obtener una ecuación útil o modelo matemático que tenga validez estadística, ésto se logra a través del procedimiento de pruebas estadísticas que se presenta a continuación.

7.4.1 Procedimiento de Pruebas Estadísticas

A. Establecimiento de una posible regresión entre las variables independientes (X_1, X_2, X_3, X_4) y la variable respuesta (Y).

La literatura recomienda que para cuatro variables independientes se puede considerar un modelo con cuatro variables cuadráticas y seis interacciones dobles (52), así:

$$Y_c = a + b_1 X_1^2 + b_2 X_2^2 + b_3 X_3^2 + b_4 X_4^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \quad (7.4)$$

Donde:

Y_c = Es un valor predicho, obtenido a partir del modelo matemático, para valores de X_1 , X_2 , X_3 y X_4 .

b_i, b_{ij} = Coeficientes de regresión.

a = Es la intersección con el eje que representa la variable dependiente (Y_c).

Si se desean obtener otras expresiones se deben hacer modificaciones a la Ecuación 7.4 como las siguientes :

- 1- Considerar que las variables independientes son lineales sin incluir las interacciones.
- 2- Considerar cuatro variables independientes lineales Y cuatro cuadráticas sin incluir interacciones.
- 3- Incluir interacciones dobles, triples Y cuádruples (éstas se muestran en la tabla 7.8) en la expresión

del numeral anterior.

TABLA 7.8
INTERACCIONES POSIBLES CUANDO SE RELACIONAN
CUATRO VARIABLES INDEPENDIENTES

Interacción Doble	Interacción Triple	Interacción Cuádruple
$X_1 X_2$	$X_1 X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3 X_4$
$X_1 X_3$	$X_1 X_2 X_4$	
$X_1 X_4$	$X_1 X_3 X_4$	
$X_2 X_3$	$X_2 X_3 X_4$	
$X_2 X_4$		
$X_3 X_4$		

4- Eliminar uno o más términos de las expresiones que se obtuvieron en los numerales anteriores, creando nuevas ecuaciones o modelos matemáticos.

De los diferentes modelos matemáticos que se van a obtener mediante estas modificaciones, el realmente valioso será aquel que pase todas las pruebas estadísticas que se mencionarán posteriormente.

- B. Cálculo de los valores Y_c y de las desviaciones a partir de la regresión anterior y de los valores experimentales de Y , X_1 , X_2 , X_3 y X_4 obtenidos y aplicados en la investigación.

Los valores de Y_c se calcularán para cada corrida, a partir de su respectiva combinación de niveles de variables independientes, por medio de la regresión planteada y se comparan con los valores experimentales (Y); además, se calculan los residuos o desviaciones (D), siendo éstos la diferencia entre el valor de la variable respuesta experimental (Y) (promedio de dos repeticiones por corrida) y el valor obtenido con la regresión (Y_c) (53).

$$D = Y - Y_c \quad (7.5)$$

D es un indicativo de la desviación de los valores predichos o de regresión (Y_c) con respecto a los valores experimentales (Y).

En esta etapa se obtendrá una tabla en cuyas columnas estarán los valores de variable respuesta experimental (Y) y de regresión (Y_c) y los de las desviaciones (D), además tendrá doce filas que representan cada una de las corridas experimentales.

- C. Evaluación de la correlación de los datos experimentales de regresión.

La confiabilidad de un modelo puede asegurarse al examinar la cercanía entre los valores predichos por la regresión (Y_c) y experimentales (Y). Una buena ecuación o modelo matemático es el que mejor resume la relación entre X_1, X_2, X_3, X_4 y Y .

El coeficiente de correlación indica la estrechez entre los valores experimentales, este valor elevado al cuadrado recibe el nombre de coeficiente de determinación, el cual al ser multiplicado por cien indica el porcentaje de las muestras cuya relación entre variables puede ser explicada por el modelo matemático.

Estos dos valores se calculan mediante las siguientes expresiones (52):

$$r = \pm \left[1 - \frac{\sum(Y - Y_c)^2}{\sum(Y - Y_m)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.6)$$

$$r^2 = \left[1 - \frac{\sum(Y - Y_c)^2}{\sum(Y - Y_m)^2} \right] \quad (7.7)$$

$$Y_m = \frac{\sum Y}{n} \quad (7.8)$$

Donde:

n : Es el número de corridas experimentales

r : Coeficiente de correlación

r^2 : Coeficiente de determinación

Y_m : Es el promedio de las respuestas de todas las corridas

D. Evaluación de la significancia estadística de la correlación.

Para evaluar la significancia estadística de la correlación debe hacerse una comparación entre el valor de r calculado con la Ecuación 7.6 y valores de r de tabla a diferentes niveles de significancia (5% y 1%, ver anexo D).

Para establecer los valores de r de tabla se deben definir los grados de libertad, así (28):

$$\text{Grados de libertad (DF)} = n - m \quad (7.9)$$

Donde m es el número de variables independientes de la investigación.

Entonces, si r calculado es mayor que r de tabla, la correlación será estadísticamente significativa:

- Si r calculado es mayor que r de tabla a 1% de significancia, la correlación es altísimamente significativa.
- Si el valor de r calculado es menor que r de tabla al 1% pero mayor que r de tabla al 5% de significancia, la correlación será altamente significativa.
- Si el valor de r calculado es menor que r de tabla al 5% pero mayor que r de tabla al 10% de significancia, la correlación es significativa.

- Si r calculado es menor que r de tabla al 10% de significancia, la correlación no es significativa (28).

E. Evaluación de la significancia estadística de la regresión por análisis de varianza utilizando la prueba de F y el nivel de significancia mínimo.

1- Distribución de Fisher (Prueba de F)

Antes de utilizar un modelo matemático para hacer predicciones es bueno confirmar su confiabilidad estadística mediante un análisis de varianza. Esta prueba consiste en comparar un valor de F calculado contra un F crítico de tablas (ver anexo D) a diferentes niveles de significancia.

El valor de F se calcula mediante la ecuación 7.10 (52):

$$F = \frac{[\sum(Y-Y_m)^2 - \sum(Y-Y_c)^2/k]}{\sum(Y-Y_c)^2 / [n - (k+1)]} \quad (7.10)$$

Donde k es el número de variables independientes utilizados en la regresión (incluyendo las interacciones).

Para establecer F crítico de tablas se necesitan dos datos:

- i) Número de variables independientes en la regresión =
Grados de Libertad en el numerador: k .
- ii) Grados de Libertad en el denominador: $n - (k+1)$.

Entonces si F calculado es mayor que F crítico de tabla, esto indica que la regresión es significativa (52), siendo la interpretación del grado de significancia la misma que la del coeficiente de correlación.

2- Nivel de Significancia Mínimo (P)

El valor de P da el nivel de significancia más pequeño al cual se puede rechazar la hipótesis (52), es decir, es el nivel de significancia al cual la regresión planteada no es significativa o útil desde el punto de vista estadístico (52).

El nivel de significancia mínimo (P) está relacionado con el valor de F de la siguiente manera (52):

- i) Si F calculado $<$ F crítico de tabla a un nivel de significancia (α) utilizado en el análisis de varianza, el valor de P será mayor que α .
- ii) Si F calculado $<$ F crítico a un nivel de significancia (α) utilizado en el análisis de varianza, el valor de P será menor que (α).
- iii) Si F calculado cae entre dos valores de F críticos, entonces $\alpha_1 < P < \alpha_2$.

En el primer caso según la prueba de F , se trata de una hipótesis rechazada, en los otros dos casos ésta es aceptada. Es importante dar un dato preciso de P y no expresarlo como un rango, tal como aparece en los

tres literales anteriores; para obtener este valor se debe encontrar un modelo matemático que relacione los valores de F crítico con los respectivos niveles de significancia para los determinados grados de libertad correspondientes al error [k y n-(k+1)] que serán específicos de esta regresión en esta investigación.

En este estudio las regresiones fueron de naturaleza logarítmica o semilogarítmica. Siendo la variable independiente el nivel de significancia y la variable dependiente el valor de F de tabla (55), así como se muestra en las ecuaciones 7.11 y 7.12.

$$\log \& = \log A + b \log F \quad (7.11)$$

$$\log \& = \log A + F \log b \quad (7.12)$$

P se calcula introduciendo el dato de F calculado al modelo matemático, el valor de P será igual al correspondiente valor de & calculado. Otro uso que se le puede dar a esta regresión es la generación de datos para tener tablas más complejas que las de la literatura.

F. Evaluación de la capacidad de predicción de la regresión.

Cuando se presenten datos tabulados como lo indica la tabla 7.10, se podrá observar si los valores experimenten

tales (Y) son similares o iguales a los predichos o de regresión (Y_c). Las desviaciones (D) indican el grado de diferencia entre estos datos. Cada una de las desviaciones (D) y la sumatoria de éstas (ΣD) deben de ser iguales a cero (53) o próximos a él, éstos son indicadores del grado de predicción de la regresión.

7.4.2 Uso de Computadora

Debido al elevado número de cálculos a realizarse en esta evaluación estadística, el paquete de computación STATGRAPHICS fue recomendado y usado en esta investigación (55).

7.4.3 Ejemplo de Aplicación del Procedimiento de Pruebas Estadísticas (52)

Devore y Peck reportaron un artículo que describe un análisis de regresión cuya variable independiente es Y (Índice de absorción de fosfato de un sedimento) y dos variables independientes X_1 (cantidad de hierro extraíble) y X_2 (cantidad de aluminio extraíble). El análisis estuvo basado en la muestra de 13 observaciones que se muestra en la tabla 7.9.

TABLA 7.9
VALORES DE VARIABLES RESPUESTA EXPERIMENTAL (Y) E
INDEPENDIENTES (X_1 y X_2) PARA MUESTRA DE 13 OBSERVACIONES

OBSERVACION	X_1 HIÉRRO EXTRAIBLE mg	X_2 ALUMÍNIO EXTRAIBLE mg	Y INDICE DE ADSORCION
1	61	13	4
2	175	21	18
3	111	24	14
4	124	23	18
5	130	64	26
6	173	38	26
7	169	33	21
8	169	61	30
9	160	39	28
10	244	71	36
11	257	112	65
12	333	88	62
13	199	54	40

A- La regresión propuesta es:

$$Y_c = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (7.13)$$

Los coeficientes resultantes del análisis de regresión son:

$$a = -7.351; b_1 = 0.11273; b_2 = 0.249$$

Por lo tanto:

$$Y_c = -7.351 + 0.11273 X_1 + 0.349 X_2 \quad (7.14)$$

No se reporta el cálculo de los coeficientes de la ecuación 7.13 porque fueron obtenidos con un paquete de computación.

B- El literal B del procedimiento de pruebas estadísticas indica que se deben de calcular y de tabular los datos de Y_c y D para cada observación, el cálculo de éstos se llevará a cabo con las ecuaciones 7.14 y 7.5, los resultados se observan en la tabla 7.10.

TABLA 7.10
VALORES DE VARIABLES RESPUESTA EXPERIMENTAL (Y) Y DE REGRESION (Y_c) Y DE LAS DESVIACIONES (D) PARA CADA UNA DE LAS OBSERVACIONES (52)

OBSERVACION	Y	Y_c	D
1	4	4.06	-0.06
2	18	19.71	-1.71
3	14	13.54	0.46
4	18	14.66	3.34
5	26	29.64	-3.64
6	26	25.41	0.59
7	21	23.22	-2.22
8	30	32.99	-2.99
9	28	24.30	3.70
10	36	44.94	-8.94
11	65	60.71	4.29
12	62	60.90	1.10
13	40	33.93	6.07
	$\Sigma Y = 388$		$\Sigma D = -0.01$

C- Según el literal C del procedimiento de pruebas estadísticas debe evaluarse la correlación de los datos experimentales y de regresión, mediante las ecuaciones 7.6 y 7.7.

Con la ecuación 7.8 se calcula el promedio de la respuesta de todas las observaciones (Y_m):

$$Y_m = \frac{\sum Y}{n} = \frac{388}{13} = 29.84615385$$

Mediante los datos de Y y Yc reportados en la tabla 7.10, se calculan los siguientes valores:

$$\sum(Y-Y_c)^2 = 191.8$$

$$\sum(Y-Y_m)^2 = 3721.7$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(Y-Y_c)^2}{\sum(Y-Y_m)^2} = 1 - \frac{191.8}{3721.7} = 0.948$$

$$r = \left[1 - \frac{\sum(Y-Y_c)^2}{\sum(Y-Y_m)^2} \right] = 0.9737$$

Este resultado significa que el 94.8% de los datos experimentales están representados en la regresión planteada mediante el valor de r^2 expresado como porcentaje.

D- Para $n-m = 13-2 = 11$ grados de libertad y niveles de significancia del 5% y 1% se obtienen los valores de coeficiente de correlación de tabla (ver tabla en anexo D), los cuales se muestran en la tabla 7.11.

TABLA 7.11

COEFICIENTE DE CORRELACION (r) DE TABLA PARA 11 GRADOS DE LIBERTAD Y NIVELES DE SIGNIFICANCIA DEL 5% Y 1%

NIVEL DE SIGNIFICANCIA	r
5%	0.532
1%	0.661

El r calculado es mayor que r de tabla para ambos niveles, por lo tanto la correlación entre los datos experimentales y los datos predichos por la regresión planteada es altísimamente significativa.

En este caso por fines educativos se hace comparación con tabla. Aunque no es necesaria por el alto valor de r . Esta prueba es importante cuando el valor calculado es diferente de uno y muy bajo (28).

E- Cálculo de F mediante la Ecuación 7.9, comparación con F crítico de tabla a diferentes niveles de significancia y cálculo del nivel de significancia mínimo por medio de un modelo matemático del tipo de la Ecuación 7.10 o de la 7.11.

$$\Sigma(Y-Y_m)^2 - \Sigma(Y-Y_c)^2 = 3529.9$$

$$\Sigma(Y-Y_c)^2 = 191.8$$

Grados de libertad en el numerador = variables independientes de la regresión: k (igual a dos).

Grados de libertad en el denominador: $n - (k+1)$ (10)

$$F_{\text{calculado}} = \frac{3529.9/2}{191.8/10} = 92.02$$

Para 2 y 10 grados de libertad se definen valores de F crítico de tabla a diferentes niveles de significancia (ver tabla de valores de F crítico en el anexo

D), los cuales se muestran en la tabla 7.12.

TABLA 7.12

VALORES DE DISTRIBUCION DE FISHER DE TABLA (F CRITICO)
A NIVELES DE SIGNIFICANCIA DE 5% Y 1%
PARA 2 Y 10 GRADOS DE LIBERTAD

NIVEL DE SIGNIFICANCIA	F
5%	4.10
1%	7.56

F calculado F crítico de tabla en los dos niveles de significancia por lo tanto la regresión planteada es altísimamente significativa.

2- La regresión que existe entre F crítico y el nivel de significancia para 2 y 10 grados de libertad es la ecuación 7.14:

$$\log \& = -0.403576552 - 0.214011166 F \quad (7.14)$$

La ecuación 7.14 se puede expresar como la ecuación 7.15:

$$\& = ab^F = 0.394842 (0.61093)^F \quad (7.15)$$

P debe de ser menor que 0.01 (1%).

Para F calculado (92.02) el nivel de significancia es igual a P.

$$\begin{aligned} \& = P &= 0.394842 (0.61093)^{92.02} \\ P &= 8.005 \times 10^{-21} \end{aligned}$$

Por ser P un valor tan pequeño numéricamente, se define igual a cero.

Ya que P es menor de 0.01 (nivel de significancia del 1%), la regresión es altísimamente significativa.

- F- Solamente las observaciones 1, 3 y 6 tienen valores de desviación cercanos a cero, las restantes tienen valores de D bastante altos; sin embargo, la sumatoria de las desviaciones es igual a -0.01, el cual es un valor muy cercano a cero, por lo que la correlación pasa la prueba que requiere que la sumatoria de las desviaciones debe ser igual a cero o similar a éste, lo que indica que el modelo matemático planteado tiene una alta capacidad de predicción.

VIII. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA

El diseño y construcción del sistema en estudio para la remoción de hierro y manganeso, se hizo en base a criterios dados en la bibliografía consultada y otros proporcionados por personas conocedoras del tema; involucrándose en éstos, el efecto de las variables independientes y fijas explicadas en el diseño experimental.

El sistema consta básicamente de un aireador, seguido de un filtro a presión. En el primero se pretende oxidar la mayoría de los compuestos ferrosos; en el segundo se supone se eliminarán por retención los óxidos e hidróxidos férricos y mangánicos, y también por una posible acción autocatalítica los compuestos manganosos.

En general, el material utilizado en la construcción del sistema es PVC (cloruro de polivinilo). Este se seleccionó por su bajo costo y resistencia a: corrosión, productos químicos (cloro) y presión según el espesor utilizado (56).

En las siguientes secciones se presenta la descripción, tanto del aireador como del filtro, y los criterios utilizados en su diseño y construcción.

8.1 DESCRIPCION DEL AIREADOR

El tipo de aireador seleccionado es el de difusión. El contacto aire-agua se realiza en un recipiente abierto a la atmósfera, al hacer burbujear aire a presión a través de un volumen de agua predeterminado, durante un tiempo de contacto previamente fijado.

Se persigue transformar en el proceso oxidativo a los compuestos de hierro y manganeso de menor valencia (Fe^{+2} y Mn^{+2}) para favorecer de esta forma la adsorción de los compuestos manganosos, en la siguiente operación de filtrado pues estos últimos como ya se mencionó prácticamente no son afectados en la aireación.

Posteriormente para asegurar un mayor tiempo de contacto de reaccionante y formación de flóculos se proporciona un tiempo predeterminado de reacción y sedimentación.

También se evalúa el efecto del cloro al dosificar hipoclorito de calcio, al aireador, después del tiempo de reacción y sedimentación proporcionado a éste, en un proceso discontinuo antes de ingresar al filtro.

8.1.1 Partes Básicas

Al aireador está conformado por los siguientes componentes:

1- Un recipiente cilíndrico, abierto a la atmósfera, de material plástico; cuyas dimensiones son: diámetro 44.5 cm, altura 65 cm.

Este equipo se seleccionó debido a la disponibilidad y porque sus dimensiones permiten obtener una relación altura/diámetro cercana a la recomendada, para mantener una adecuada mezcla (35).

La relación altura/diámetro recomendada es 2 y la de trabajo 1.5

2- Dos difusores de aire, desmontables de la parte media inferior (ver fig.8.1), cada uno con tamaño de orificio de 2.4 y 4.2 mm, que corresponden a los niveles considerados en el diseño experimental.

Su diseño básicamente tiene la forma de una cruz dentro de un cuadro; se hizo de tuberías y accesorios de PVC de $\frac{1}{2}$ plg.(ver fig.8.2).

Cada difusor consta de 37 orificios y la distancia de separación entre ellos es de 4:5 cm.

La forma y separación entre los orificios del difusor, tiene como objetivo evitar las zonas muertas y/o el colapso de burbujas adyacentes, para asegurar de esta manera una mejor distribución de las burbujas de aire en la superficie del líquido (ver capítulo 7, sección 7.1.3, literal A y numerales 6 y 7).

El detalle del distribuidor de aire y de su parte desmontable se muestra en la figura 8.3.

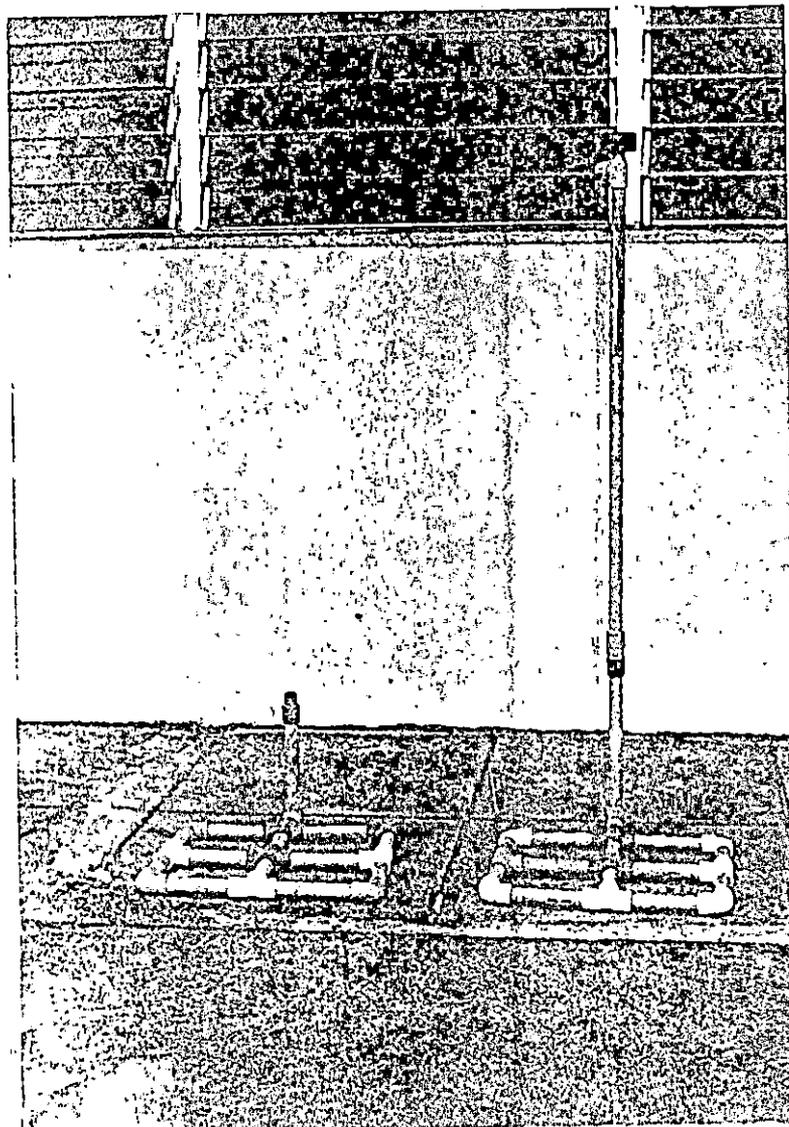


Fig.8.1 Difusores de aire desmontables del sistema de aireación utilizado para la oxidación del hierro y manganeso.

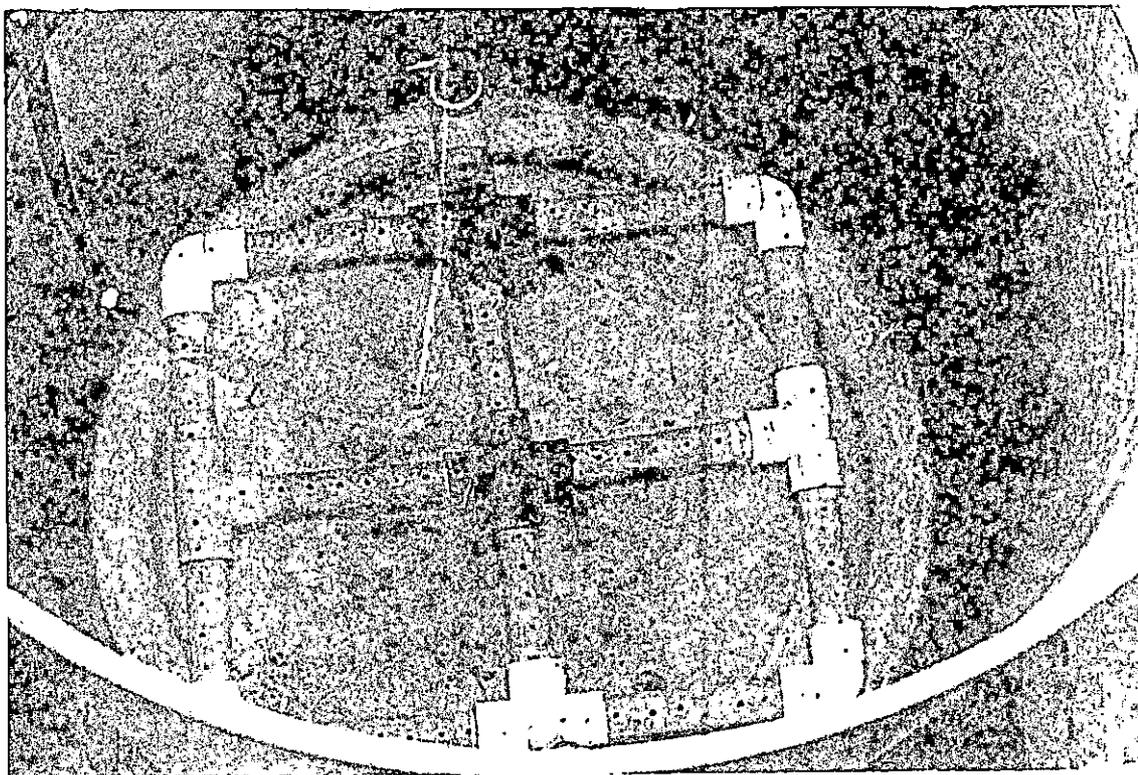


Fig.8.2 Vista del difusor en el tanque de aireación utilizado para la oxidación del hierro y manganeso.

3- Una válvula de aguja, ubicada en la parte superior del difusor, para regular el flujo de aire que entra a éste. El material de construcción es cobre y el diámetro $3/8$ plg.

Se seleccionó este tipo de válvula ya que se caracteriza por proporcionar un control preciso y excelente cuando se desea obtener una corriente pequeña de gas y la caída de presión no presenta ninguna desventaja (56).

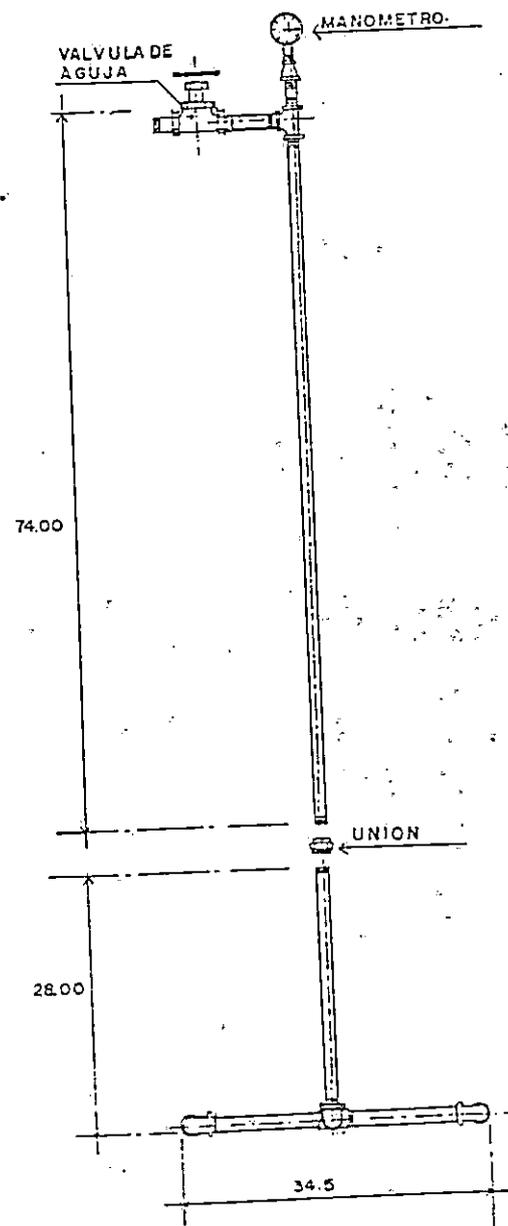
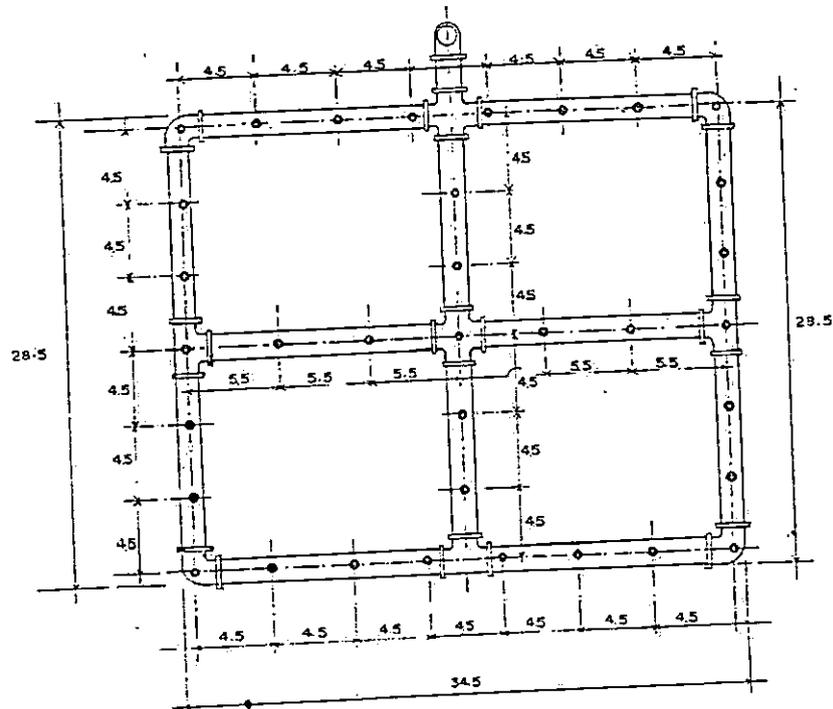


Fig.8.3 Vista en planta y en elevación del distribuidor de aire empleado en la oxidación de hierro y manganeso. Cotas: cm.

4- Manómetro, también ubicado en la parte superior del distribuidor, con el cual se mide la presión de entrada del aire proveniente del compresor (ver fig.8.4).

El rango de medición es de 0-60 lb/plg² man.

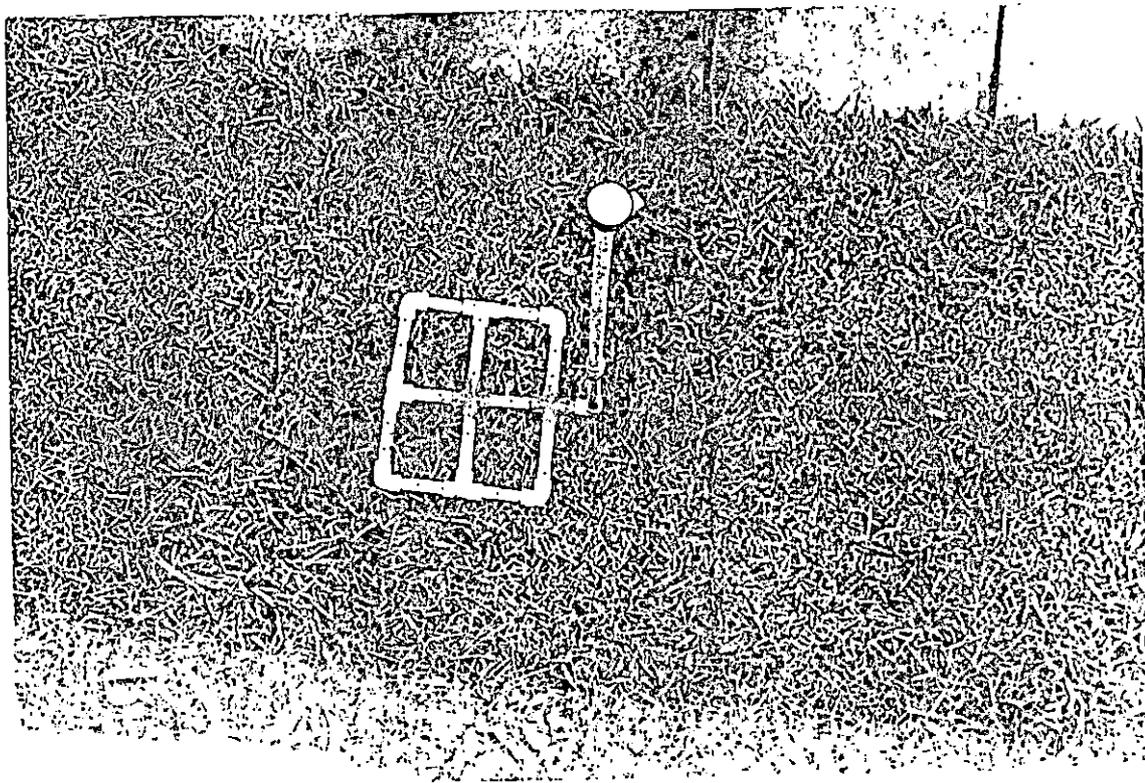


Fig.8.4 Ubicación del manómetro en el distribuidor de aire del sistema de aireación empleado para la oxidación del hierro y manganeso.

5- Un compresor eléctrico, para el suministro de aire, a través de la columna del líquido desde el fondo del recipiente. Las especificaciones del compresor son:

Capacidad : 1/2 hp
Caudal : Variable
Voltaje : 120 Volt
Corriente : 8.5 A

La selección de este equipo se hizo en función de la disponibilidad y flujo de aire proporcionado por éste; observando visualmente las características de burbujeo obtenida con diferentes compresores y a diferentes regulaciones de la válvula de aguja.

Se seleccionó el compresor que proporcionó el flujo de aire que produjo, según el criterio de los experimentadores, la mejor distribución de las burbujas en la superficie del líquido y una turbulencia moderada (ver capítulo 7, sección 7.1.3 literal A y numerales 4 y 5). El flujo de aire suministrado al sistema de aireación es $32 \text{ m}^3/\text{h}$, obtenido con una regulación de 2 vueltas de la válvula de aguja.

Cabe mencionar que el uso de compresores es recomendado en los procesos de aireación por difusión, ya que, aunque son de mayor costo que los sopladores, se caracteriza por vencer mayores presiones que éste.

6- Una válvula de compuerta, ubicada a la salida del aireador para permitir el paso del agua aireada al filtro.

El material de construcción es PVC y el diámetro 1/2 pulg.

TABLA 9.4

RESULTADOS EXPRESADOS COMO PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO DURANTE LA ETAPA DE VERIFICACION DEL PROCESO DE AIREACION CON LA CORRIDA 5

REPETICIONES \ PORCENTAJE DE RENDIMIENTO	REMOCION DE HIERRO (%)	REMOCION DE MANGANESO (%)
Primera repetición (Y_1)	82.50	40
Segunda repetición (Y_2)	83.27	40
Tercera repetición (Y_3)	85.09	40
Promedio (Y)	83.62	40
Coefficiente de variación (%)	1.59	0

TABLA 9.5

CONCENTRACIONES DE HIERRO Y MANGANESO SOLUBLES A LA ENTRADA Y SALIDA DEL AIREADOR Y LA CONCENTRACION DE METAL OXIDADO DURANTE EL PROCESO DE AIREACION CON LA CORRIDA 5 EN LAS ETAPAS DE EXPERIMENTACION Y VERIFICACION

ETAPA	ENTRADA DEL AIREADOR		SALIDA DEL AIREADOR		METAL OXIDADO	
	ppm de Hierro	ppm de Manganeso	ppm de Hierro	ppm de Manganeso	ppm de Hierro	ppm de Manganeso
Inicial de experimentación	0.92	1.0	0.00000	0.72495	0.92000	0.27505
Verificación	1.40	1.5	0.22932	0.90000	1.17068	0.60000

res y el aireador no alcanza a oxidar el 100% de hierro; sin embargo, las cantidades de metal oxidado fueron mayores, estos valores pueden verse en la tabla 9.5.

TABLA 9.3

CONDICIONES DE TRABAJO DE LA CORRIDA 5, UTILIZADA PARA LA VERIFICACION DE RESULTADOS EN EL PROCESO DE AIREACION, UTIL PARA LA OXIDACION DEL HIERRO Y EL MANGANESO SOLUBLES EN LAS MUESTRAS DE AGUA

VARIABLE	NIVEL	VALOR
Tiempo de aireación (X_1)	+	30 min
Diámetro de orificio (X_2)	+	4.2 mm
Altura de agua (X_3)	-	48.67 cm
Tiempo de reacción (X_4)	-	15 min

El valor de porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro o manganeso obtenido durante la etapa de verificación se toma como el resultado real y se sustituye por el valor del 100% correspondiente a la corrida 5, esto en el caso de la remoción de hierro, para la de manganeso, el valor de 40% sustituye al de 27.5%. Este nuevo grupo de resultados es el que se utilizó en el análisis estadístico.

9.3.2 Resultados Obtenidos en el Proceso de Filtración

Los resultados obtenidos durante el proceso de filtración se muestran en la tabla 9.6.

niveles "+" y "-", se sustituyen por sus respectivos valores).

El porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro o manganeso en el aireador se calculó mediante la ecuación 7.1.

Verificación de Resultados:

Para la verificación de resultados se seleccionó la corrida 5, pues es la que mejor representa el funcionamiento del aireador al obtenerse con ella un rendimiento en la remoción de hierro del 100% (la remoción de manganeso es igual al 27.5%), por ser ésta una condición ideal, es conveniente verificar su repetibilidad. Otra corrida que pudo haberse seleccionado es la 7 ya que el porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro es 91.85% y el de manganeso es 31.67% (mayor que el de la corrida 5), pero su coeficiente de variación es mayor.

Las condiciones de trabajo de la corrida 5, determinadas por su combinación de niveles, se muestran en la tabla 9.3.

La corrida de verificación se llevó a cabo por triplicado. El resultado promedio del porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro fue 83.62% y el de manganeso fue 40%, la tabla 9.4 muestra estos resultados. Este valor difiere del anterior, debido a que las concentraciones iniciales de hierro y manganeso son mayores que las anterior-

TABLA 9.2

RESULTADOS EXPRESADOS COMO PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO, OBTENIDOS DURANTE EL PROCESO DE AIREACION UTILIZADO PARA LA OXIDACION DE AMBOS METALES SOLUBLES EN LAS MUESTRAS DE AGUA

CORRIDA	VARIABLES INDEPENDIENTES				PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE HIERRO.			COEFICIENTE DE VARIACION (%)	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE MANGANESO			COEFICIENTE DE VARIACION (%)
	TIEMPO DE AIREACION (min) X_1	DIAMETRO DE ORIFICIO (mm) X_2	ALTURA DE AGUA (cm) X_3	TIEMPO DE REACCION SEDIMENTACION (min.) X_4	PRIMERA REPETICION Y_1	SEGUNDA REPETICION Y_2	PROMEDIO Y		PRIMERA REPETICION Y_1	SEGUNDA REPETICION Y_2	PROMEDIO Y	
1	30	4.20	60.84	45	50.54	51.10	50.82	0.7792	33.340	33.340	33.340	0.00
2	30	2.40	60.84	45	77.78	77.78	77.78	0.0000	64.916	64.916	64.916	0.00
3	15	4.20	48.64	45	47.82	42.32	45.07	8.6200	25.930	25.930	25.930	0.00
4	30	4.20	60.84	15	61.50	66.76	64.13	5.8000	25.930	25.930	25.930	0.00
5	30	4.20	60.84	15	100.00	100.00	100.00	0.0000	29.000	26.000	27.500	7.71
6	30	2.40	60.84	15	75.00	75.00	75.00	0.0000	29.830	29.830	29.830	0.00
7	15	2.40	48.67	45	94.57	89.13	91.85	4.1870	33.340	30.000	31.670	7.46
8	15	2.40	48.67	15	83.30	94.40	88.85	8.8370	29.830	29.830	29.830	0.00
9	15	4.20	48.67	45	83.33	65.98	74.30	17.1800	24.760	23.260	24.010	4.42
10	30	2.40	60.84	45	78.60	76.90	77.75	1.5500	25.930	22.220	24.080	10.90
11	15	4.20	48.67	15	88.60	83.15	85.87	4.4800	50.000	50.000	50.000	0.00
12	15	2.40	48.67	15	54.70	73.91	64.30	21.1900	25.930	25.930	25.930	0.00

cer la forma más eficaz de realizar la limpieza del lecho filtrante, preservando siempre cierta cantidad de los óxidos precipitados, ya que éstos son los responsables del proceso autocatalítico.

9.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA EXPERIMENTAL

En base al ordenamiento y tratamiento de las muestras establecidas en la tabla 7.7, se llevaron a cabo doce corridas experimentales con el agua del pozo 34 de Guluchapa, con el objeto de estudiar el comportamiento del aireador y del filtro en la remoción de hierro y manganeso.

Al obtener los resultados de porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro y manganeso, se escogió la corrida que dio mayor rendimiento para llevar a cabo repeticiones, con el fin de verificar si las respuestas eran similares o iguales y comprobar si el comportamiento del sistema construido en condiciones de trabajo constantes es el mismo. Las repeticiones de cada corrida se efectuaron por duplicado y se estableció su repetibilidad mediante el cálculo del coeficiente de variación de cada corrida.

9.3.1 Proceso de Aireación

Los resultados obtenidos para la remoción de hierro y manganeso en el proceso de aireación se muestran en la tabla 9.2 (está hecha como la tabla 7.7, los símbolos de los

generan subgrupos en base al diámetro de partícula y altura de lecho filtrante.

Al inicio de cada día de experimentación, el filtro se lavaba y desairaba adecuadamente. Posteriormente se realizaban las corridas correspondientes, observando los siguientes parámetros: el flujo de agua a la salida del filtro y la pérdida de carga durante la operación. Tomando en cuenta cualquier fluctuación que indicara un funcionamiento inadecuado del filtro (ver Capítulo 8). Finalmente el agua era recolectada en el recipiente de agua tratada, colocado a la salida del filtro.

Durante la fase experimental la capacidad filtrante-oxidativa no llegó a agotarse, por lo que no fue necesario retrolavar para regenerar el medio. Sin embargo, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para determinar tal capacidad, sin llegar a obtener resultados satisfactorios, aunque sí se determinó la cantidad de hierro y manganeso retenido por sorción en el lecho filtrante durante el período de funcionamiento del filtro en todas las etapas de esta investigación, esta determinación se llevó a cabo por medio de cálculos de balance de materia (miligramos de hierro y manganeso), con el fin de conocer la cantidad de hierro y manganeso depositado en un pie cúbico de lava volcánica utilizada. Además se realizaron lavados de la piedra utilizada con cuatro soluciones diferentes para cono

El volumen de agua a tratar se aireó, se dejó reaccionar y sedimentar durante un período suficientemente largo como para asegurar una buena oxidación.

b- Filtración

La realización de estas pruebas se dividió en ocho bloques de corridas, esta división fue hecha en base a las variables cloración, diámetro de partícula y altura del lecho filtrante, tal como lo muestra la tabla 9.1.

TABLA 9.1
DESCRIPCION DE LA DIVISION DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE FILTRACION, HECHA EN BASE A LAS VARIABLES: DIAMETRO DE PARTICULA, ALTURA DE LECHO FILTRANTE Y CLORACION

Bloque	NIVEL DE VARIABLE			Corrida (s)
	Diámetro de Partícula	Altura del Lecho Filtrante	Cloración	
1	-	+	-	11
2	-	-	-	8 y 12
3	+	+	-	14 y 5.
4	+	-	-	6
5	-	+	+	3 y 9
6	-	-	+	7
7	+	+	+	1
8	+	-	+	2 y 10

La cloración divide la experimentación en dos grupos de cuatro bloques, primero se llevan a cabo las pruebas sin cloro para evitar el contacto de este producto químico con el sistema construido, dentro de éstos dos grupos se

De igual manera se tomaron las muestras para análisis a la salida del filtro.

Todas las muestras se acidificaron para su análisis posterior.

- c- Para la determinación de cloro residual libre, se hizo uso de un kit DPD, con agua sin acidificar y filtrada.
- d- En la filtración, el mantenimiento del flujo constante y cualquier tipo de lavado realizado se hizo con agua exenta de hierro, manganeso y cloro.
- e- Antes de iniciar la etapa experimental en el filtro, para lograr una acción auto catalítica efectiva, fue necesario "cargar" la piedra del medio filtrante con una película de óxidos de hierro y manganeso. Esto se realizó haciéndole pasar al filtro el agua proveniente del proceso de aireación.

B. Procedimiento Seguido en la Etapa Experimental

El procedimiento seguido para la realización de las pruebas es el siguiente:

a- Aireación

Las corridas experimentales en la aireación se llevaron a cabo según la combinación de niveles de variables independientes que muestra la tabla 7.7, el orden no es el establecido, ya que se llevaron a cabo al azar.

- a- Instalación del equipo en el lugar de trabajo, con lo que se pretende superar en la medida de lo posible, la oxidación durante el transporte de las muestras de agua a distancia.

El volumen de agua requerido fue extraído directamente del pozo, tomando las precauciones del caso para evitar el menor contacto con el aire. El agua fue trasladada al lugar de tratamiento en bidones llenos hasta el rebose para evitar la formación de espacios de aire o burbujas y cerrados herméticamente con cinta teflón.

- b- Toma de muestra para análisis.

Antes de dar inicio a cada corrida se tomaba una muestra sin filtrar a la salida del pozo, considerando que dentro de él, tanto el hierro como el manganeso se hallaban presentes totalmente en estado soluble. Siendo los resultados de los análisis, las concentraciones de hierro y manganeso iniciales (Co).

En el aireador, al final de cada corrida, las muestras se tomaron en la parte clasificada del agua, una con filtración, utilizando un filtro de 0.45 micrones, para conocer los valores de concentraciones de hierro y manganeso solubles a la salida del aireador, la otra muestra se tomó sin filtrar para determinar las concentraciones totales de ambos metales a la entrada del filtro.

minar así la eficiencia del lecho de lava volcánica.

9.1 ETAPA DE FAMILIARIZACION

En esta etapa se partió inicialmente con pruebas de familiarización, utilizando agua proveniente del pozo de la Colonia San Felipe en San Bartolo. Se optó por este procedimiento ya que el proceso de aireación es determinante para lograr una filtración oxidativa eficiente. A través de la familiarización se logró, posteriormente, ejecutar de una mejor manera la etapa de experimentación, propiamente dicha al tomar en cuenta una serie de condiciones que influyeron en la obtención de resultados más representativos, las cuales no hubiesen sido posible conocer de ninguna otra forma.

9.2 ETAPA EXPERIMENTAL

Una vez evaluada la fase de familiarización se continuó con la fase experimental, utilizando agua del pozo 34 de Guluchapa.

9.2.1 Descripción de la Parte Experimental en Guluchapa

A. Condiciones Generales

Las condiciones de trabajo durante el desarrollo de la experimentación en Guluchapa se resumen a continuación:

IX. DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo la etapa experimental de esta investigación fueron necesarios una serie de procedimientos en lo que se refiere a la construcción y puesta en marcha del sistema utilizado:

- A- Diseño y construcción del sistema.
- B- Preparación de la piedra volcánica que servirá como lecho filtrante (ver anexo E).

Posteriormente se lleva a cabo la parte experimental que se realiza en dos fases. En la primera, únicamente se trabaja el proceso de aireación; con el fin de determinar las condiciones a las cuales la eficiencia en la oxidación de los iones ferrosos fuese máxima, de tal forma que aunque el manganeso sufriera únicamente una oxidación parcial, ambos iones metálicos entrarán al filtro oxidados en su mayor parte a fin de promover el efecto autocatalítico posteriormente esperado.

Una segunda etapa consistió en probar el sistema en conjunto (aireación-filtración), a fin de evaluar ambas operaciones simultáneamente, habiendo fijado previamente las mejores condiciones de trabajo en el aireador y deter-

determinado por la combinación de las etapas de cloración y filtración a flujo máximo y mínimo; establecidos en cada una de las corridas experimentales del filtro.

Son 4 los casos resultantes de la combinación de estas etapas. Estos casos se muestran en la tabla 8.2, la cual presenta los tiempos de residencia totales del agua en el sistema; por lo que se incluyen los tiempos de aireación y reacción y sedimentación.

TABLA 8.2

TIEMPOS DE RESIDENCIA TOTALES DEL AGUA EN EL SISTEMA

E t a p a	Tiempos de residencia (min)			
	1	2	3	4
Aireación	30	30	30	30
Reacción y sedimentación	15	15	15	15
Cloración	20	--	20	--
Filtración a flujo máximo	14.4	14.4		
Filtración a flujo mínimo			28.8	28.8
Tiempo de residencia total	79.4	59.4	93.8	73.8

1,2,3,4: Caso 1, caso 2, caso 3, caso 4.

NOTA: *La determinación de los tiempos de residencia de estas 2 etapas se presenta en el anexo C.

7. Flujo de agua alimentado al filtro
Máximo: $0.3169 \text{ m}^3/\text{h}$ (1.4 gal/min)
Mínimo: $0.1589 \text{ m}^3/\text{h}$ (0.7 gal/min)

8. Tasa o velocidad de filtración (se calcula dividiendo el flujo de agua proporcionado por el filtro entre el área del lecho filtrante, el detalle del cálculo se presenta en el anexo C).
Máxima: 17.15 m/h
Mínima: 8.7 m/h

9. Velocidad de limpieza (se calcula por la relación entre: el flujo de agua proporcionado al filtro para su limpieza y el área del lecho filtrante, la forma de cálculo se presenta en el anexo C).
Velocidad: 18.68 m/h

10. Tiempo de limpieza: (se utiliza el recomendado por la literatura 17).
Tiempo: 10 min.

11. Cantidad de agua usada en la limpieza del filtro (se determina en base al flujo de agua y tiempo de limpieza proporcionados al filtro, ver anexo C).
Volumen: 0.0568 m^3

12. Tiempo de residencia del agua en el sistema.
El tiempo de residencia del agua en el sistema está

3. Tiempo de Reacción y Sedimentación

Máximo: 45 min

Mínimo: 15 min

B. Etapa Experimental de Aireación y Filtración

1. Volumen de Agua Aireada

Mínimo: 0.0757 m^3 (20 gal)

2. Tiempo de Aireación

Máximo: 30 min

3. Tiempo de Reacción y Sedimentación

Mínimo: 15 min

4. Tiempo de Contacto (cloración)

Máximo: 20 min

Mínimo: ---

5. Cantidad de agua usada en la deaireación del filtro

(la metodología usada en su determinación se presenta en el anexo C).

Volumen: 0.03011 m^3

6. Tiempo de residencia del agua en la etapa de desaireación del filtro (se determina por la relación entre el volumen de agua utilizado para deairear el filtro y el caudal proporcionado por la bomba, ver anexo C).

Tiempo: 5.4 min (0.09 h)

las pruebas experimentales en el aireador y filtro.

Dentro de estas especificaciones, unas fueron seleccionadas y fijadas en el paso cuatro del diseño experimental (selección de los niveles de las variables independientes), otras se determinaron en pruebas familiarización y las restantes se determinaron matemáticamente con los datos obtenidos de la experimentación.

Caso particular se tiene, en las tres primeras especificaciones de trabajo del filtro que se presentan, las cuales corresponden a las especificaciones de trabajo del aireador con las que se obtienen las mejores condiciones para la oxidación del Fe^{+2} .

En el anexo C se presenta la metodología y cálculos realizados para la obtención de las especificaciones de trabajo determinadas experimental y matemáticamente.

A. Etapa Experimental de Aireación

1. Volumen de Agua Aireada

Máximo: 0.0946 m^3 (25 gal)

Mínimo: 0.0757 m^3 (20 gal)

2. Tiempo de Aireación

Máximo: 30 min

Mínimo: 15 min

Para el sistema construido se recomienda que la pérdida de carga no pase de 15 lb/plg^2 ya que podría dañar el sistema (44).

C. Necesidad de Retrolavado

Para el correcto funcionamiento de un filtro es necesario efectuar retrolavados con cierta frecuencia.

En el filtro construido, el retrolavado debe efectuarse cuando la pérdida de carga sea mayor de 15 lb/plg^2 y/o cuando la concentración de hierro y manganeso a la salida sea igual o mayor que a la entrada (28,44).

Se efectúa haciendo pasar agua en sentido inverso (por el fondo del filtro) durante 10 minutos a velocidad 2 veces mayor que el flujo de salida. El agua de retrolavado se descarga por una válvula de chorro ubicada sobre la base del filtro (17).

Al finalizar el retrolavado debe eliminarse el agua que no pudo ser evacuada por la válvula de chorro, se realiza permitiendo la salida de ésta a través del sistema de drenaje, ubicado en la parte más baja del filtro.

8.5 ESPECIFICACIONES DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

A continuación se presentan las especificaciones de trabajo del proceso diseñado, con las cuales se realizaron

Si el flujo a la salida del filtro disminuye es necesario abrir más la válvula de globo ubicada en la entrada de agua al filtro para mantener la tasa de filtración constante. Esta manipulación de la válvula de globo disminuye la pérdida de carga gradual del filtro.

B. Control de Pérdida de Carga

Se realiza mediante la inspección visual periódica a los manómetros ubicados en la entrada y salida del filtro.

Se evalúa restando a la presión de salida del filtro la presión de entrada cuando el lecho filtrante está limpio y después de cierto tiempo de funcionamiento.

La diferencia es la pérdida de carga total en el filtro.

La evaluación de la pérdida de carga en el filtro es de gran importancia ya que determina el estado en que éste se encuentra. Aumentos progresivos de pérdida de carga con el tiempo pueden significar (17,39):

1. Colmatación rápida de las capas superiores de la lava que no permite se realice filtración a profundidad.
2. Obstrucción en el sistema de drenajes.
3. Limpieza inadecuada del lecho filtrante.

La pérdida de carga es también un parámetro que se utiliza para determinar el final de la carrera de filtración o necesidad de lavado (17).

La limpieza se realiza haciendo pasar agua durante 10 minutos, a través del lecho filtrante y sistema de tuberías (28).

Los pasos 2, 3 y 4 descritos anteriormente deben hacerse utilizando agua exenta de Fe, Mn y Cloro.

Una vez iniciado el proceso de filtración es necesario controlar:

- a) Flujo de agua a la salida del filtro.
- b) Pérdida de carga en el sistema.
- c) Necesidad de reactivar el lecho, si éste se ha agotado (retrolavado).

A. Control de Flujo

El flujo en el filtro se regula mediante válvulas de globo ubicadas a la entrada y salida del filtro y se controla periódicamente por un método simple de medición de flujo, que consiste en medir el tiempo que tarda, el flujo de agua obtenido a la salida del filtro, en llenar un recipiente de volumen conocido.

El control de flujo es necesario ya que está directamente relacionado con la velocidad de filtración (tasa de filtración), la cual debe ser constante durante el proceso de filtración.

mente de los siguientes pasos previos:

1. Cebado de la bomba

Para evitar la cavitación.

2. Retrolavado

Al poner por primera vez en marcha el filtro y cada vez que se cambia la altura de lecho o tamaño de partícula, es necesario retrolavar con el fin de acomodar uniformemente el lecho filtrante (45).

3. Deaireación

Para eliminar el aire dentro del filtro y evitar consiguientes incrementos de presión.

Se realiza introduciendo agua por el fondo del filtro, la cual al ascender evacúa el aire contenido en el sistema por el pequeño orificio ubicado sobre la cabeza del filtro. Este orificio debe cerrarse en el momento que el agua comience a salir a través de él (44).

4. Limpieza

Al reiniciar la operación después de un cierto tiempo de reposo, debe hacerse un lavado general del filtro, ya que el agua retenida en su interior, sufre oxidación que origina agua de color café-rojizo; la cual debe ser evacuada (28).

k. Recuento en placa y coliformes

8.4.1 Proceso de Aireación

Básicamente el control del proceso de aireación debe vigilarse en lo referente a: tiempos de aireación, reacción y sedimentación y cloración; además de la determinación de cloro residual libre presente.

Posteriormente durante el paso del agua a través del filtro (una vez finalizada la aireación) es necesario mantener el nivel de agua en el aireador para lograr un flujo constante a la salida del filtro.

El mantenimiento del proceso requiere de exámenes visuales al distribuidor de aire y proceso de difusión. Burbujas no uniformes indican la obstrucción del distribuidor. También deben inspeccionarse las tuberías (accesorios y uniones) en busca de cualquier posible fuga (31,39).

En caso de obstrucción, generalmente ocasionada por depósitos de Fe y Mn, debe efectuarse una limpieza del distribuidor con una solución de ditionito de sodio al 4% (28).

8.4.2 Proceso de Filtración

La operación del proceso de filtración consta básica-

pues debido a la naturaleza de la experimentación, cada corrida puede considerarse como un lote.

La operación y mantenimiento del sistema construído son sencillos, aunque requieren estricto control de tiempo, manipulación de válvulas y flujos de agua, así como de inspecciones visuales periódicas al distribuidor de aire y manómetros. Para el control operacional se establecen puntos de comparación relacionados con la remoción del hierro y manganeso presentes en el agua cruda (antes de aireación) y en el agua tratada (después de la filtración), que son los parámetros con los cuales se evalúa el rendimiento en las pruebas experimentales.

Pueden también ser considerados, de acuerdo a las necesidades, los siguientes parámetros:

- a. pH
- b. Sólidos totales disueltos
- c. Cloruros
- d. Sulfatos
- e. Alcalinidad
- f. Dureza
- g. Color
- h. Turbidez
- i. Acido sulfhídrico
- j. Materia orgánica

En el filtro construido, la altura de la columna de agua sobre el lecho filtrante es de 0.7 y 1.2 m, para las alturas de 0.8 y 0.4 m, respectivamente.

10. Ubicación de la Salida de Agua en el Filtro

La ubicación de la salida de agua en el filtro se diseñó a la altura de éste, con el objetivo de evitar la entrada de aire ocasionada por la disminución del nivel de agua en el filtro; lo cual puede ocurrir en cortes de energía eléctrica, donde por el efecto de la cabeza estática (presión que ejerce la columna de agua en el filtro cuando está en reposo) el filtro se vacía hasta la altura de la tubería de salida de agua de éste (49).

8.3 REPRESENTACION GRAFICA DEL SISTEMA CONSTRUIDO

El esquema y las características generales del sistema diseñado y construido para la remoción de hierro y manganeso se presenta en los planos 1/3, 2/3 y 3/3 remoción de hierro y manganeso a través de aireación y retención en un lecho de lava volcánica, los cuales se encuentran ubicados al final de este documento.

8.4 OPERACION Y MANTENIMIENTO

El sistema construido trabaja en forma discontinua,

Capacidad : 0.34065 m³/h
Voltaje : 118 volt AC
Corriente : 8.5 A
Potencia : 1.27 hp

La forma en que se determinaron estas condiciones se presenta en el anexo C.

Esta bomba fue seleccionada debido a la disponibilidad y capacidad que presentó para empujar la columna de agua contenida en el aireador, a través de la tubería y filtro. Además, este tipo de bomba es el recomendado para trabajar a bajas velocidades de flujo y en instalaciones alimentadas por gravedad, que son las características del sistema construido.

Otros criterios utilizados para el diseño y construcción del filtro se describen a continuación.

9. Altura de Agua sobre el Lecho Filtrante

En filtros a presión, se recomienda que la columna de agua sobre el lecho filtrante oscile entre 0.6-1.2 m, a fin de evitar la acumulación de aire en el lecho, ya que ésto ocasiona variaciones en la velocidad de filtración (40,44).

tir el paso del agua al filtro y a la salida de éste (ver fig.8.15).

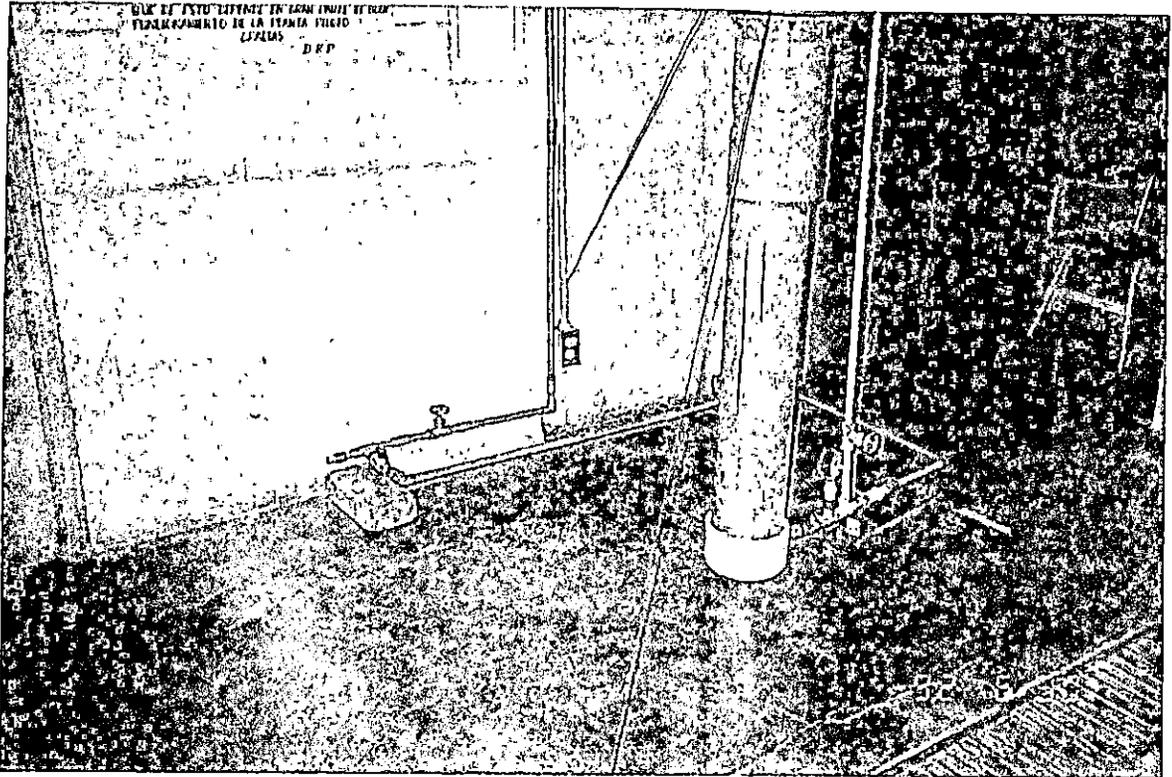


Fig.8.15 Vista de la ubicación de las válvulas de bola y de compuerta en el sistema de tuberías inferior del filtro empleado para la remoción de hierro y manganeso.

8. Una bomba, para suministrar el agua al filtro, tanto la que proviene del aireador como la que se introducirá para deairearlo y retrolavarlo, se utilizó una bomba centrífuga de especificaciones no conocidas, por lo que fue necesario determinar las condiciones de trabajo de ésta, que resultaron ser:

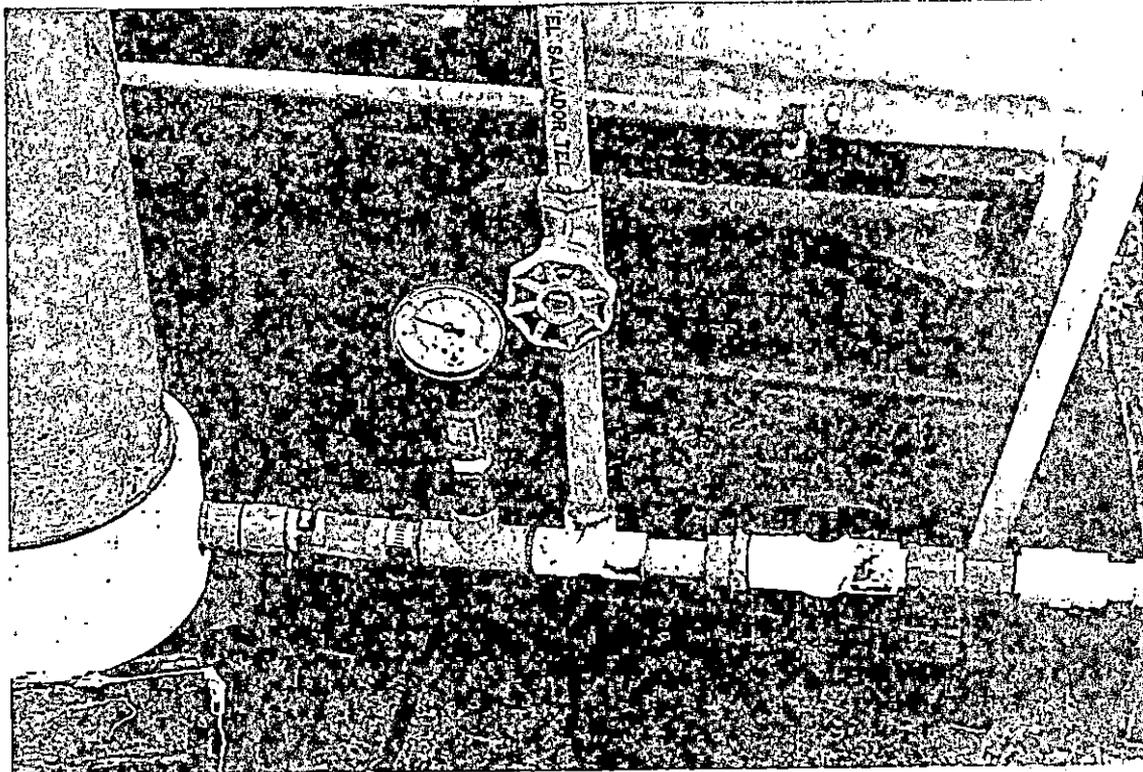


Fig.8.14 . Vista del manómetro ubicado a la salida del filtro retenedor de hierro y manganeso.

6. Dos válvulas de bola, ubicadas en el sistema de tubería inferior, permiten la entrada de agua en sentido opuesto a la filtración. Son recomendadas para el control de abrir o cerrar sistemas a presión (56).

7. Dos válvulas de compuerta, también ubicadas en el sistema de tubería inferior. Tienen como objetivo permi

de este tipo de válvula influya en la lectura de dicho manómetro (44).

El rango de medición de los manómetros es de 0-60 lb/plg man.

La ubicación de los manómetros se presenta en las figuras 8.13, 8.14 y en el plano 2/3.

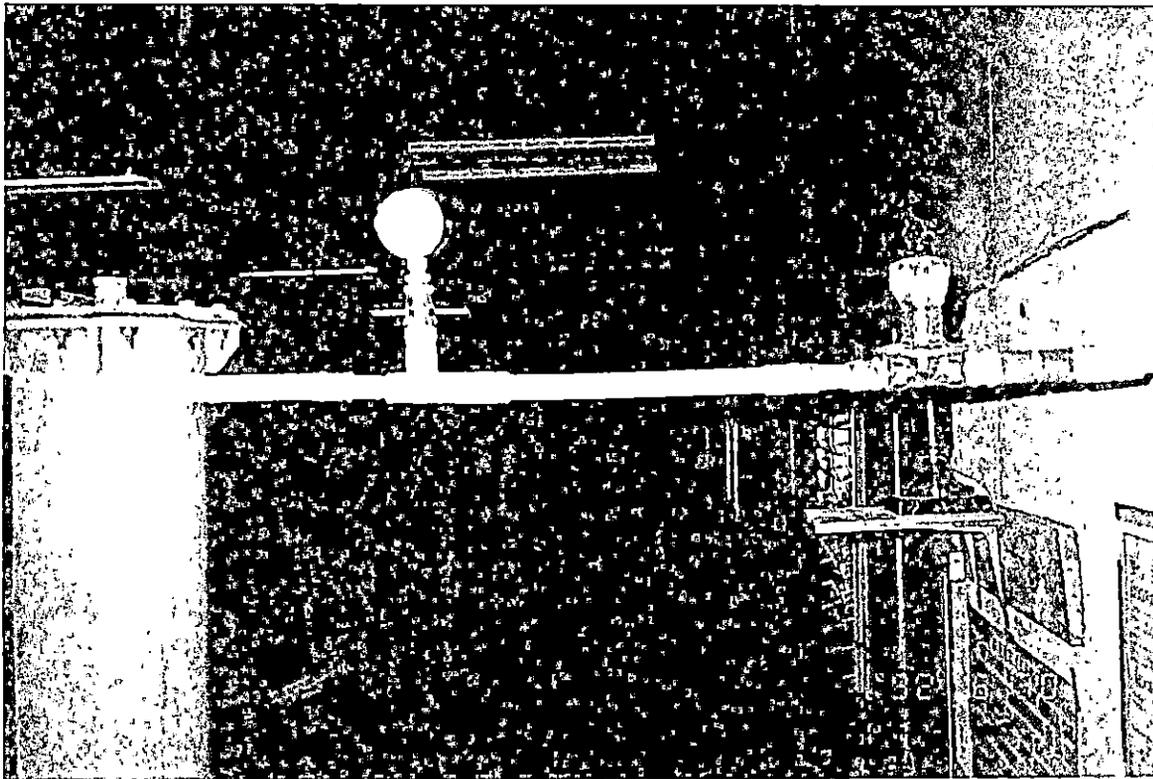


Fig.8.13 Vista del manómetro ubicado a la entrada del filtro retenedor de hierro y manganeso.

selección del parámetro de diseño: "Porcentaje de expansión de lecho filtrante durante el retrolavado", el cual fue de 50%, para cada una de las alturas de lecho filtrante seleccionadas en el diseño experimental; o sea que, para las alturas de lecho filtrante de 0.8 y 0.4 m, las válvulas de chorro se encuentran ubicadas 0.4 y 0.2 m arriba de la superficie del lecho filtrante, respectivamente.

El porcentaje de expansión de lecho filtrante seleccionado, es el recomendado en las especificaciones de diseño de filtros comerciales, utilizados para la remoción de Fe, Mn y H_2S (Birm, Filox y Greensand) y filtros rápidos (45,66).

La ubicación de las válvulas de chorro se presenta en la vista lateral derecha en elevación del plano 2/3 remoción de hierro y manganeso a través de aireación y retención en un lecho de lava volcánica.

5. Dos manómetros, ubicados cerca de la entrada y salida del filtro, para determinar las fluctuaciones de pérdida de carga dentro de éste (44).

El manómetro ubicado a la entrada del filtro, se ha instalado a una distancia de 0.37 m después de la válvula de globo (ver fig.8.13), con el objetivo de evitar que las variaciones de presión generadas por la regulación

b) Un distribuidor de agua, ubicado en la parte superior interna de la caja del filtro. Tiene como objetivo permitir la entrada uniforme de agua, para evitar perturbaciones en la superficie del lecho filtrante y turbulencia en la columna de agua (39).

Consiste en una regadera en forma de disco de 0.10 m de diámetro y 2 cm de espesor. El material de construcción es PVC, el diámetro de los orificios 2 mm y consta de 84 orificios/área (ver fig. 8.9).

c) Sistema de deaireación, consiste en un pequeño orificio ubicado sobre la cabeza del filtro, el cual está constituido por un adaptador hembra y un tapón macho rosca (accesorios de PVC, ver fig. 8.9).

El sistema de deaireación, tiene como objetivo asegurar que el filtro se encuentra exento de aire y completamente lleno de agua; los cuales son requisitos para el correcto funcionamiento del filtro a presión (44).

d) Dos válvulas de chorro, utilizadas para evacuar el agua de retrolavado. Se encuentran ubicadas sobre la caja del filtro a las alturas de 1 y 1.6 m. El material de construcción es plástico y diámetro 1/2 plg.

La ubicación de estas válvulas fue determinada por la

4. Estructuras de Ingreso y Salida

a) Dos válvulas de globo, ubicadas a la entrada y salida del filtro, tienen como objetivo regular el flujo de agua a la salida del mismo. Se caracterizan por proporcionar un control preciso de flujo parcial y por generar caídas de presión considerables a través de ellas (44,56).

El material de construcción es plástico y el diámetro 1/2 plg.

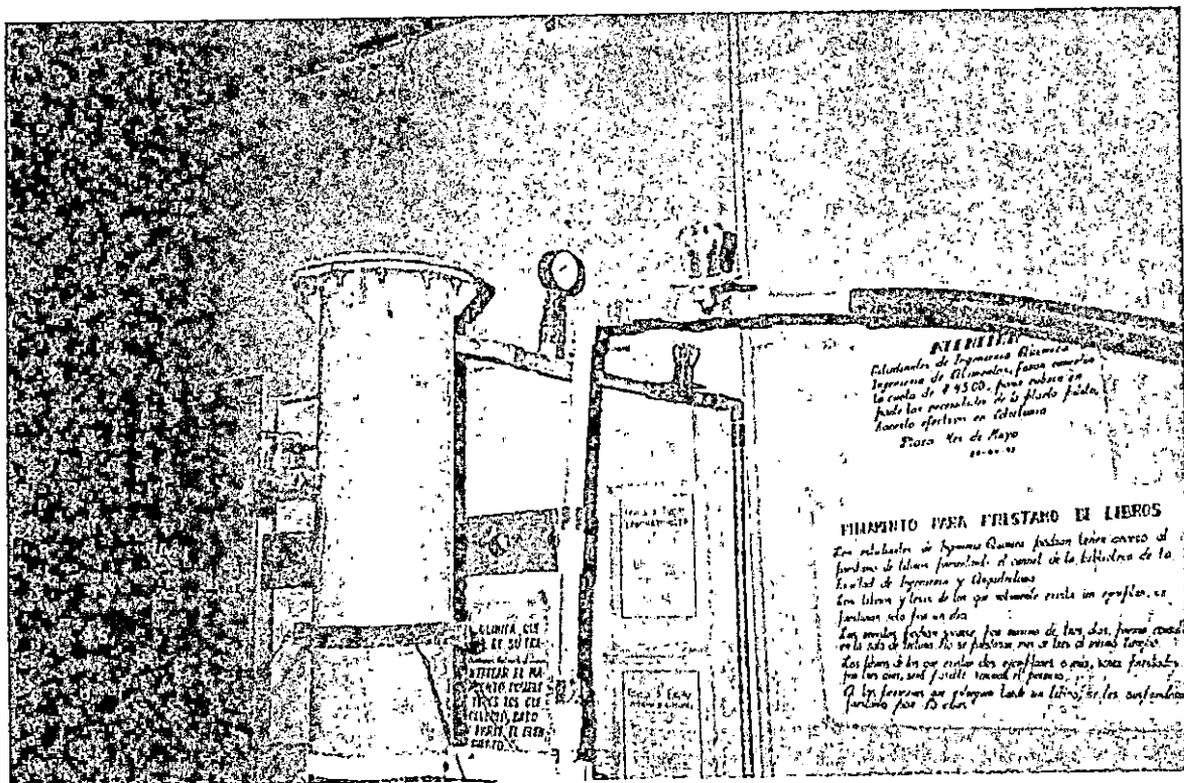


Fig.8.12 Vista de la ubicación de las válvulas de globo en el filtro, utilizado en la remoción de hierro y manganeso.

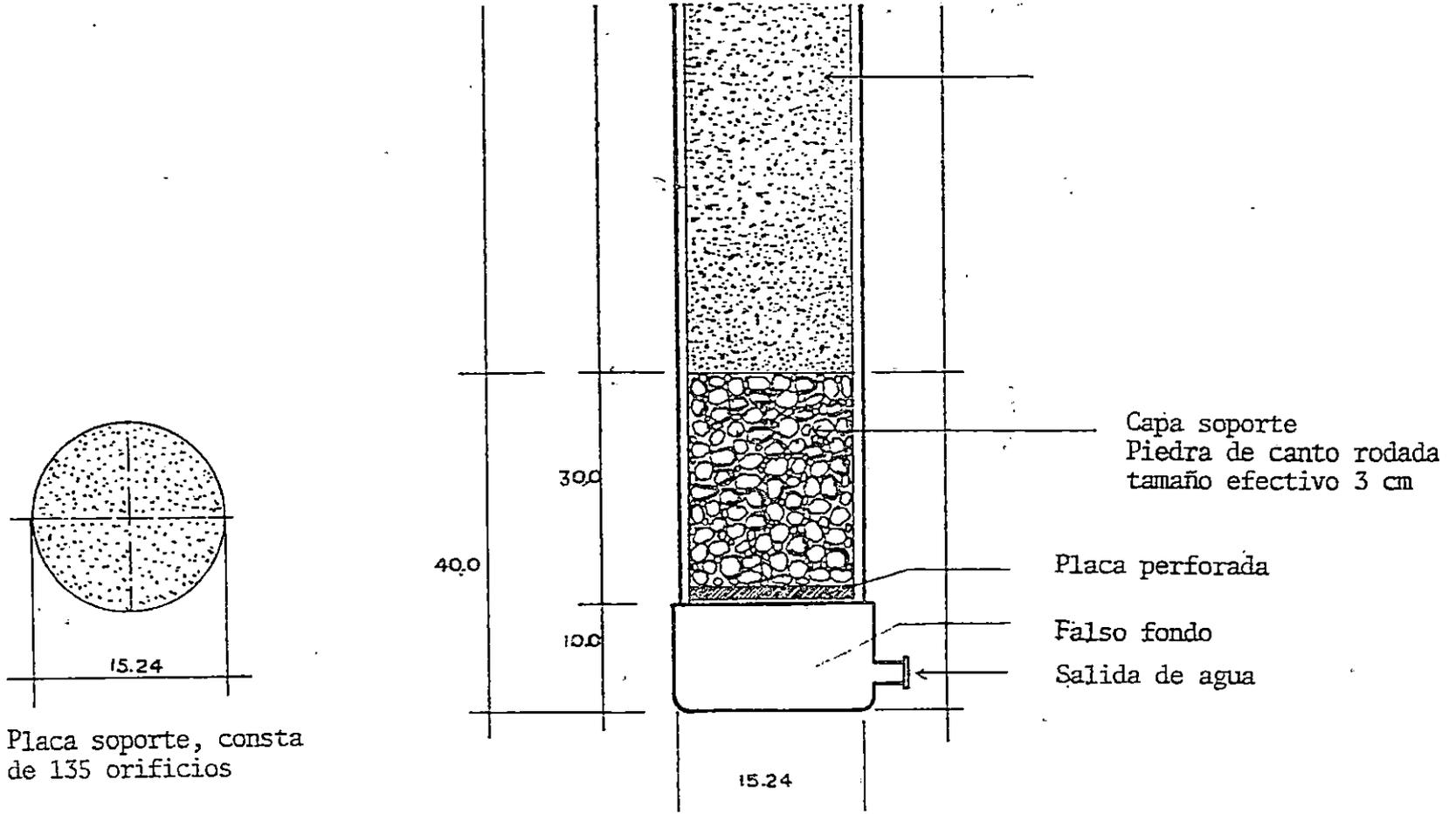


Fig.8.11 Corte longitudinal del filtro que muestra el sistema de drenaje. Cotas: cm.

- b. Falso fondo, que consiste en un espacio de 0.10 m debajo de la placa perforada, que ayuda a la distribución y recolección del agua.
- c. Una capa soporte constituida de piedra de río de 3 cm de tamaño efectivo y ubicada sobre la placa perforada.

La altura de la capa soporte seleccionada es de 0.3 m, que corresponde a la altura mínima recomendada en las especificaciones de diseño para filtros rápidos a gravedad. Alturas mayores de la capa soporte, incrementan la altura total del filtro, dificultando la operación de éste, en el sentido de manipular las válvulas de globo y sistema de deaireación que se encuentran ubicados a la altura del filtro y en la parte superior de éste, respectivamente (39,44).

Con la altura de la capa soporte se espera favorecer aún más la distribución del agua de lavado.

En la figura 8.11, se presenta el corte longitudinal del filtro construido que muestra el sistema de drenaje en éste.

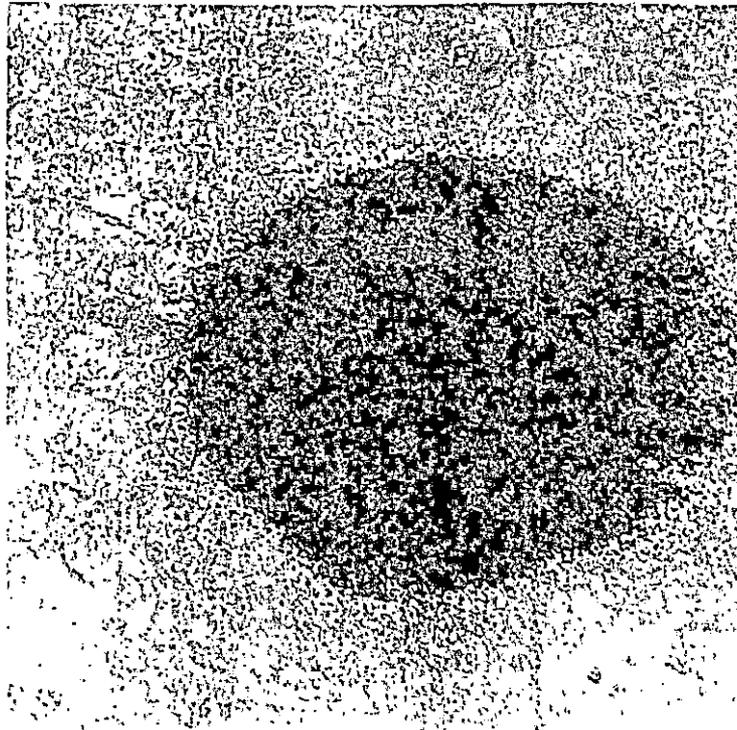


Fig.8.10 Material filtrante (lava volcánica triturada)

3. Sistema de drenaje, el cual tiene como funciones: distribuir lo más uniformemente posible, el agua de lavado al filtro; recoger el filtrado y conducirlo al recipiente de aguas claras (17,39).

Se encuentra ubicado en la parte inferior del filtro, y su diseño básicamente consiste en:

- a. Una placa perforada con 135 agujeros, que además de las funciones arriba mencionadas sostiene la capa soporte y lecho filtrante.

El material de construcción es PVC y se encuentra soldada a una altura de 0.10 m sobre la base del filtro.

2. Material filtrante, constituido por un lecho de lava volcánica negra, la cual se caracteriza por ser un material inerte, insoluble y mecánicamente resistente, además de ser un recurso local con potencial de explotación.

El tamaño efectivo y la altura de lecho filtrante, están determinados por el diseño experimental.

Los tamaños efectivos de lecho filtrante de trabajo son 0.6 mm y 1.18 mm, ambos con un coeficiente de uniformidad de 1.4; el cual se encuentra dentro del rango de los recomendados en las especificaciones de diseño para filtros rápidos, y el filtro comercial Greensand (ver tabla 8.1).

Las alturas de lecho filtrante seleccionadas fueron 0.4 y 0.8 m.

La determinación del tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad se presenta en el anexo E.

TABLA 8.1

COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD RECOMENDADOS
PARA DIFERENTES TIPOS DE FILTROS (43,45)

FILTRO	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
Rápido a gravedad	1-2 - 1.6
Rápido a presión	1.6
Greensand *	1.6

* Filtro comercial utilizado para la remoción de Fe, Mn y H₂S .

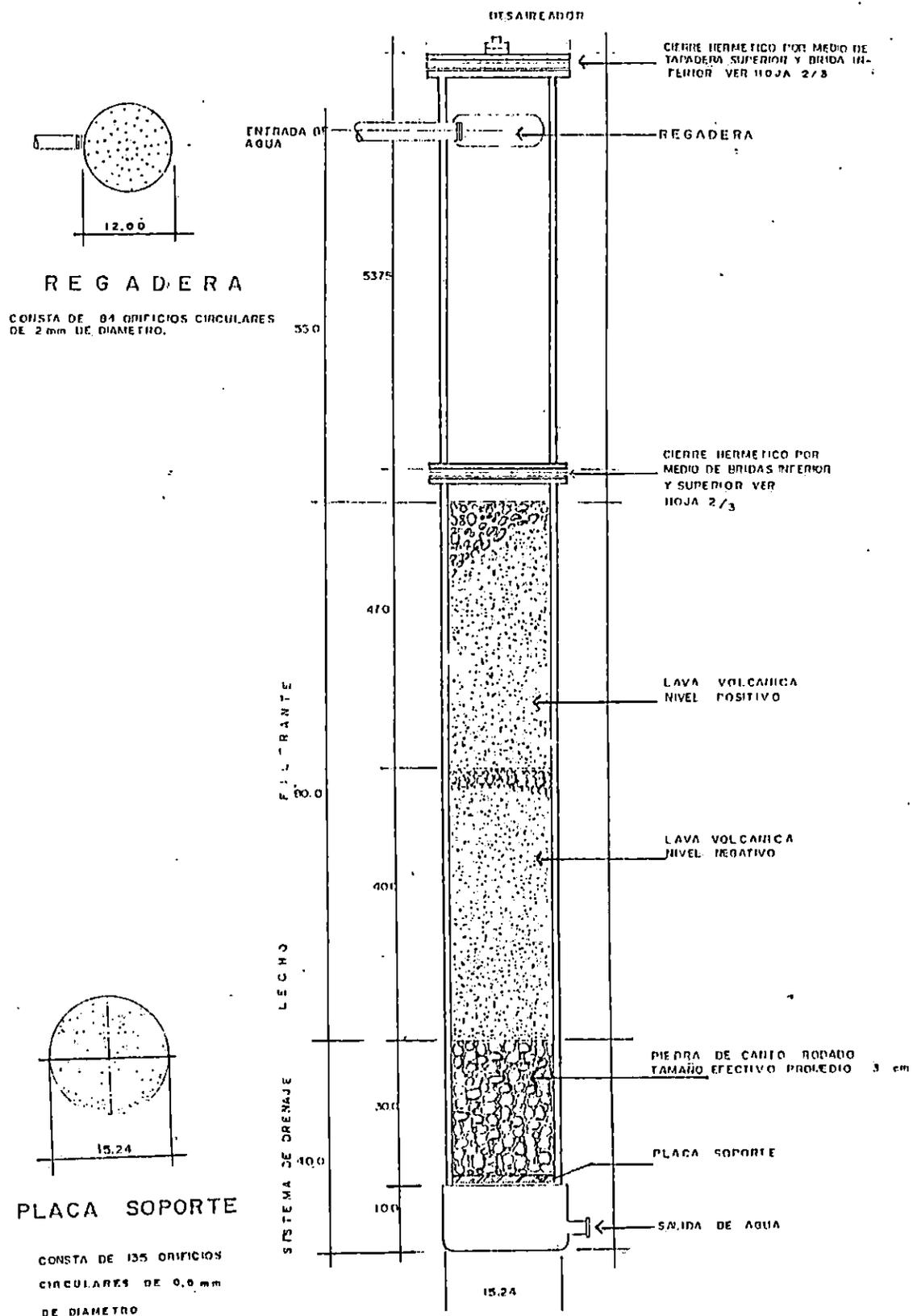


Fig.8.9 Corte longitudinal del filtro utilizado para la remoción de hierro y manganeso que muestra su estructura interna. Cotas: cm.

trabajo de 160 lb/plg^2 según las especificaciones de la norma ASTM D-2241-31. La altura del filtro es 1.9 m.

En la figura 8.8 se presenta la vista del cierre hermético, bridas y tapadera superior, y en la figura 8.9 la descripción interna del filtro.

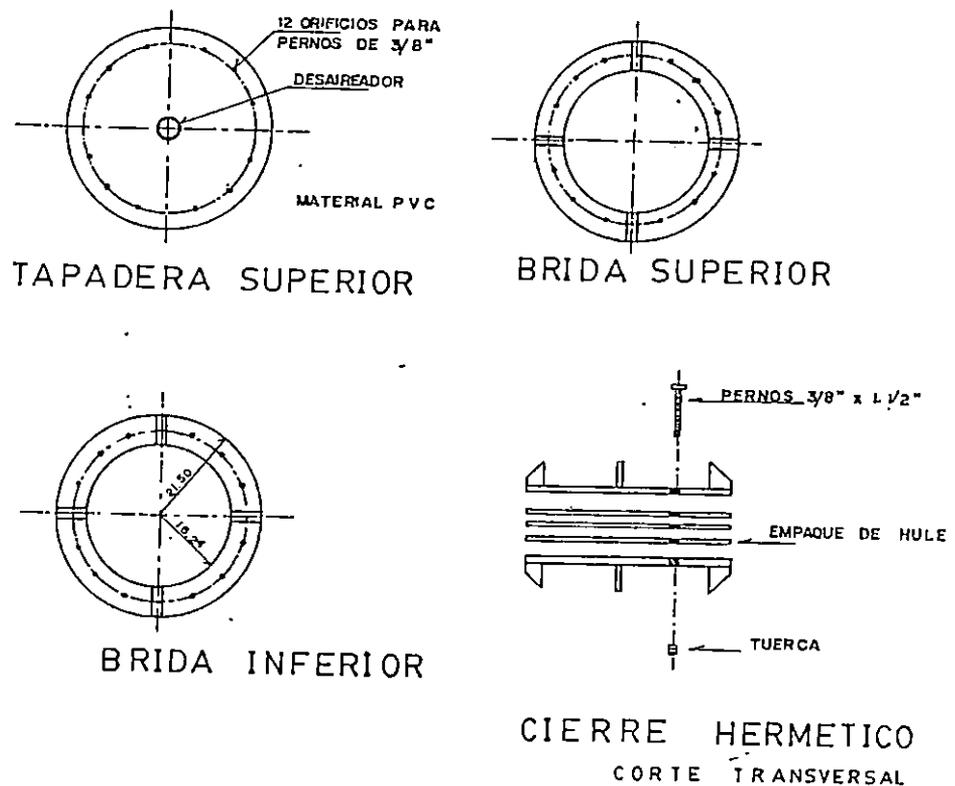


Fig.8.8 . Vista del cierre hermético, bridas y tapadera superior del filtro utilizado para la remoción de hierro y manganeso. Cotas: cm.

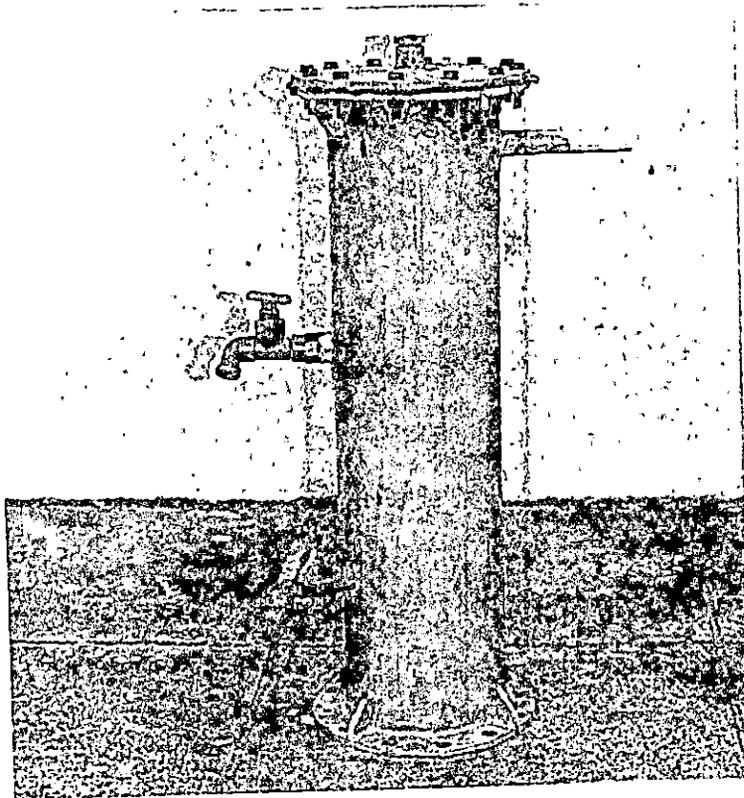


Fig.8.7 Sección desmontable superior del filtro empleado para la remoción del hierro y manganeso.

material filtrante).

El recipiente cilíndrico constituye la caja de filtro; es el componente más importante ya que en él se encuentran ubicados el material filtrante, sistema de drenaje, capa soporte y estructuras de ingreso y salida de agua (ver fig.8.9). Consiste en un tubo de PVC de 6 plg de diámetro con un espesor medio de 6.48 mm capaz de soportar presiones

8.2 DESCRIPCION DEL FILTRO

El filtro a presión construído, básicamente consiste en una unidad cilíndrica, cerrada herméticamente; en la cual el agua entra por la parte superior atravesando bajo una presión conveniente el medio filtrante y sistema de drenaje.

En él se espera, se lleve a cabo la adsorción de los compuestos manganosos y residuales de Fe^{+2} sobre los metales previamente depositados de Fe^{+3} y Mn^{+4} en la superficie de las partículas de lava.

8.2.1 Partes Básicas

El filtro está compuesto por las siguientes partes fundamentales:

1- Un recipiente cilíndrico, dividido en dos secciones una superior y otra inferior (ver figura 8.7), unidos por medio de bridas que cierran herméticamente con el auxilio de empaques de hule y que sellan al roscarse entre sí con 12 pernos de $3/8$ por $1\ 1/2$ plg (ver figura 8.8).

Ambas secciones pueden desmontarse cuando sea necesario (para reemplazar el tamaño de partículas de lava, cambiar la altura de lecho filtrante y para realizar inspecciones visuales del interior, para verificar el estado del

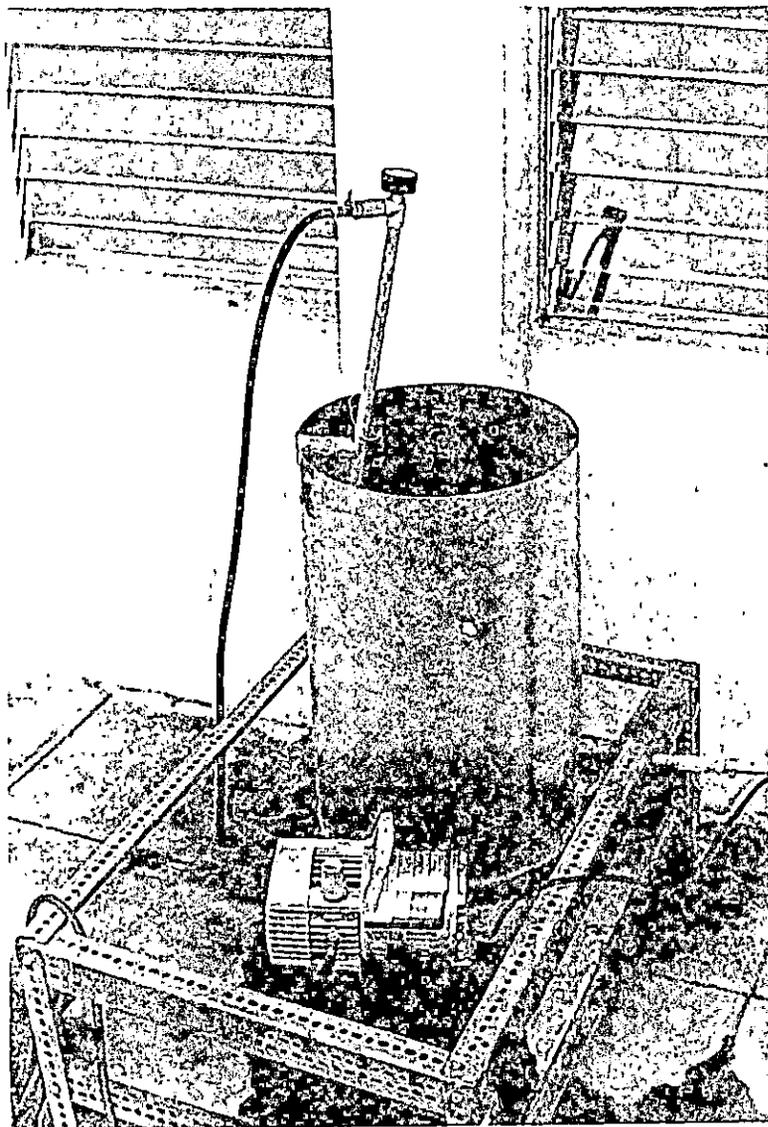


Fig.8.6 Sistema de aireación construido para la oxidación del hierro y manganeso.

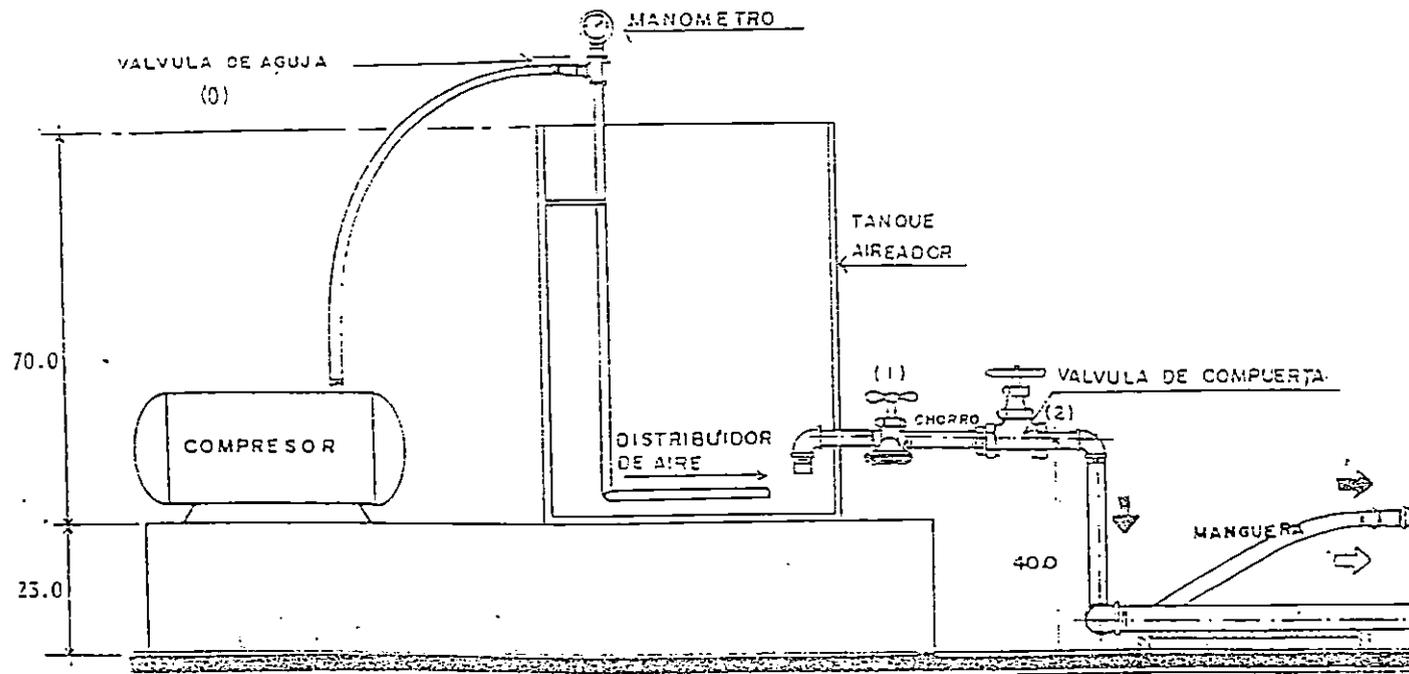


Fig.8.5 Vista frontal en elevación del sistema de aireación construido para la oxidación del hierro y manganeso.

Se ha utilizado este tipo de válvula, debido a que, a la salida del aireador no es necesario un flujo constante de agua.

Las válvulas de compuerta son recomendadas solamente para el control de abrir o cerrar (56).

7- Una válvula de chorro, ubicada a la salida del filtro, antes de la válvula de compuerta. Utilizada para la toma de muestras, en el control de cloro residual; y para evacuar el agua del tanque aireador.

El compresor y la ubicación de las válvulas de chorro y compuerta se muestra en la vista frontal en elevación del sistema de aireación que se presenta en la figura 8.5.

8- Una bomba centrífuga, utilizada para mantener constante el nivel del agua en el aireador, durante el paso de ésta a través del filtro. Sus especificaciones son:

Capacidad : Variable (1-6 gpm)

Voltaje : 115 volt A.C.

Corriente : 85 A

Potencia : 1/50 hp

TABLA 9.6

RESULTADOS EXPRESADOS COMO PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO, OBTENIDOS DURANTE EL PROCESO DE FILTRACION UTILIZADO PARA LA REMOCION DE AMBOS METALES OXIDADOS EN LAS MUESTRAS DE AGUA

CORRIDA	VARIABLES INDEPENDIENTES				PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE HIERRO.			COEFICIENTE DE VARIACION (%)	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE MANGANESO			COEFICIENTE DE VARIACION (%)
	DIAMETRO DE PARTICULA (cm) X_2	ALTURA DEL LECHO (cm) X_2	FLUJO DE AGUA (gpm) X_3	CLORACION (g de $Ca(OCl)_2$ al 65%) X_4	PRIMERA REPETICION (Y_1)	SEGUNDA REPETICION (Y_2)	PROMEDIO (Y)		PRIMERA REPETICION (Y_1)	SEGUNDA REPETICION (Y_2)	PROMEDIO (Y)	
1	1.8	80	0.7	1	92.75	91.43	92.09	1.01	100.00	100.00	100.00	0.00
2	1.8	40	1.4	1	55.20	55.00	55.10	0.26	100.00	100.00	100.00	0.00
3	0.6	80	1.4	1	99.40	99.00	99.20	0.28	100.00	100.00	100.00	0.00
4	1.8	80	1.4	0	36.00	33.40	33.70	1.19	100.00	100.00	100.00	0.00
5	1.8	80	0.7	0	38.50	38.94	38.72	0.80	100.00	100.00	100.00	0.00
6	1.8	40	0.7	0	52.00	53.52	56.76	2.04	100.00	100.00	100.00	0.00
7	0.6	40	0.7	1	88.24	87.50	87.87	0.60	100.00	100.00	100.00	0.00
8	0.6	40	1.4	0	100.00	100.00	100.00	0.00	95.32	95.32	95.37	0.08
9	0.6	80	0.7	1	93.84	93.33	93.55	0.38	100.00	100.00	100.00	0.00
10	1.8	40	1.4	1	11.20	55.00	55.10	0.26	100.00	100.00	100.00	0.00
11	0.6	80	1.4	0	91.11	89.19	90.15	1.50	86.80	85.86	86.33	0.77
12	0.6	40	0.7	0	86.30	86.60	86.45	0.25	94.12	94.45	94.29	0.25

Aunque la corrida 8 tenía un porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro del 100%, no se seleccionó ésta para la etapa de verificación sino que la corrida 3, la razón de ésto es porque la primera no incluye la cloración en su combinación de niveles de variables y el objetivo de esta investigación es obtener agua de calidad potable. La corrida 3 cumple con este requisito y además es la inmediata inferior, con respecto a su valor de porcentaje de remoción de hierro, de la corrida 8.

Las condiciones de trabajo de la corrida 3 se presentan en la tabla 9.7.

Durante la etapa de verificación la corrida 3 se llevó a cabo por triplicado, el resultado promedio del porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro es de 99.2 y el de manganeso es de 100. Los valores promedios son iguales a los tabulados por lo tanto la tabla de resultados sigue siendo la misma (tabla 9.6). En la tabla 9.8 se presentan los resultados obtenidos durante la etapa de verificación.

La tabla 9.9 muestra las concentraciones promedios de hierro y manganeso totales a la entrada y salida del filtro para la corrida 3 durante las etapas inicial de experimentación y de verificación.

TABLA 9.7

CONDICIONES DE TRABAJO DE LA CORRIDA 3, UTILIZADA PARA LA VERIFICACION DE RESULTADOS DURANTE EL PROCESO DE FILTRACION UTILIZADO PARA LA REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO OXIDADOS EN LAS MUESTRAS DE AGUA

VARIABLE	NIVEL	VALOR ^a
Diámetro de partícula (X ₁)	-	0.6 cm
Altura del lecho filtrante (X ₂)	+	80 cm
Flujo de agua (X ₃)	+	0.3028 m ³ /h
Cloración (X ₄)	+	8.6 ppm de cloro libre a la entrada del filtro ^a

* 8.6 ppm de cloro libre a la entrada del filtro se logran al agregar 1 g de Ca(OCl₂) al 65% al agua que sale del aireador.

TABLA 9.8

RESULTADOS EXPRESADOS COMO PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO DURANTE LA ETAPA DE VERIFICACION DEL PROCESO DE FILTRACION CON LA CORRIDA 3

REPETICIONES	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO	REMOCION DE HIERRO	REMOCION DE MANGANESO
Primera repetición (Y ₁)		97.6000	100
Segunda repetición (Y ₂)		100.0000	100
Tercera repetición (Y ₃)		100.0000	100
Promedio		99.2000	100
Coefficiente de variación (%)		1.3856	0

TABLA 9.9

CONCENTRACIONES DE HIERRO Y MANGANESO TOTALES PROMEDIO A LA ENTRADA Y SALIDA DEL FILTRO Y LA DE METAL REMOVIDO DURANTE EL PROCESO DE FILTRACION CON LA CORRIDA 3

ETAPA	ENTRADA DE FILTRO		SALIDA DE FILTRO		METAL REMOVIDO	
	ppm de Hierro	ppm de Manganeso	ppm de Hierro	ppm de Manganeso	ppm de Hierro	ppm de Manganeso
Inicial de experimentación	0.3125	0.3333	0.00250	0	0.31000	0.3333
Verificación	1.0100	0.9800	0.00808	0	1.00192	0.9800

TABLA 9.10

RESULTADOS PROMEDIOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS DE VERIFICACION CON AGUAS DE LOS POZOS CUAYA 6 Y 34 DE GULUCHAPA Y DE LA COLONIA SAN FELIPE DE SAN BARTOLO

METAL REMOVIDO	POZOS	INICIO	PROCESO DE AIREACION			PROCESO DE FILTRACION			PORCENTAJE DE
		CONCENTRACION TOTAL ppm	CONCENTRACION TOTAL FINAL ppm	CONCENTRACION SOLUBLE FINAL ppm	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO PROMEDIO Y	CONCENTRACION TOTAL FINAL ppm	CONCENTRACION SOLUBLE FINAL ppm	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO PROMEDIO Y	RENDIMIENTO GLOBAL Y _E
Hierro	San Felipe	0.6250	0.2001	0.15875	74.60	0.06125	0.03750	69.40	90.20
	Cuaya 6	0.3125	0.2050	0.15350	50.94	0.10000	0.06750	51.22	68.00
	34	1.4000	1.0100	0.22952	83.62	0.00808	0.00808	99.20	99.42
Manga- neso	San Felipe	1.7000	1.5000	1.11670	34.30	0.00000	0.00000	100.00	100.00
	Cuaya 6	0.6333	0.3333	0.27770	56.15	0.00000	0.00000	100.00	100.00
	34	1.5000	0.9800	0.90000	40.00	0.00000	0.00000	100.00	100.00

La diferencia de concentraciones es grande pero el sistema funcionó de tal manera que los resultados en ambos casos fueron similares, ya que el manganeso fue removido en su totalidad y el hierro en una gran parte, llegando a obtener concentraciones finales de hierro y manganeso que están abajo de los que la norma establece (0.1 ppm de hierro y 0.05 ppm de manganeso).

9.3.3 Pruebas Experimentales con Otros Tipos de Agua

Como parte de las pruebas de verificación se evaluaron las mejores condiciones de trabajo seleccionadas con aguas de otros pozos que presentaron diferentes concentraciones de hierro y manganeso que los que se examinaron anteriormente, siendo los resultados promedios los que se muestran en la tabla 9.10, en la cual se incluyen los resultados de las etapas de verificación anteriores, llevadas a cabo con agua del pozo 34 de Guluchapa.

En todos los casos, las concentraciones de hierro y manganeso al final del tratamiento cumplieron con las normas establecidas. El sistema en su totalidad funcionó eficientemente removiendo ambos metales para cualesquiera concentraciones de éstos. Con estas pruebas terminó la evaluación del sistema construido.

9.3.4 Evaluación de la Calidad del Agua Obtenida

Muestras del agua obtenida en la etapa de verificación de resultados se sometieron a una serie de análisis físicos, químicos y bacteriológicos con el fin de determinar la eficiencia del tratamiento en el sentido de obtener un agua no sólo libre de hierro y manganeso sino de calidad potable. En la tabla 9.11 se presenta una comparación del promedio de los resultados obtenidos en cada uno de los análisis físicoquímicos y bacteriológicos contra los valores que las normas de calidad de agua potable establecen.

Los límites máximos permisibles son los que están establecidos en las normas de calidad de los Estados Unidos de América, la Comunidad Europea y la Organización Mundial de la Salud (OMS) (33), seleccionando para comparación los más rigurosos entre los tres. En la tabla se observa que todos los valores estaban dentro de la norma de calidad de agua potable, lo que indica que el sistema construido permite obtener agua de muy buena calidad.

9.3.5 Evaluación de la capacidad de retención de hierro y manganeso del lecho filtrante

Para evaluar la cantidad de hierro o de manganeso depositado en el lecho filtrante, se hizo un balance de masa de estos metales a través de todas las etapas experimentales detallados anteriormente.

TABLA 9.11

COMPARACION ENTRE LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA DEL POZO 34 DE GULUCIAPA Y DEL AGUA TRATADA PROVENIENTE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO CONSTRUIDO, EL PORCENTAJE DE AUMENTO O DISMINUCION DE CADA UNA DE LAS ESPECIES ANALIZADAS Y LOS LIMITES ESTABLECIDOS POR LAS NORMAS DE CALIDAD

PARAMETRO	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE (33,28)	% REMOCION
pH	6.7	7.0	6.5 - 8.5	
Color verdadero (CU)	5	Menor de 5	15	100
Turbidez (ntu)	1.6	0.3	Menor de 1	100
Olor	Fétido	ND	ND	100
Alcalinidad (ppm de CaCO ₃)	135	130	-----	4
Dureza (ppm de CaCO ₃)	140	120	500	14.3
Sólidos totales disueltos (ppm)	250	150	350	40
Sulfatos (ppm)	70	56	250	20
Cloruros (ppm)	35	55	250	57
Materia orgánica (ppm K ₂ H ₂ O ₄)	9.1	7.1	0	22
Acido sulfhídrico (ppm)	2.49	1.49	No detectable por el consumidor	40
Hierro complejo (ppm)	0.27	ND	---	100
Hierro total (ppm)	1.15	ND	0.1	100
Hierro soluble (ppm)	1.01	ND	---	100
Manganeso total (ppm)	1.25	ND	0.05	100
Manganeso soluble (ppm)	0.98	ND	---	100
Bacterias coliformes (NMP)	5.1/100ml	0/100 ml	0/100 ml	100
Coliformes fecales (NMP)	Positivo	0/100 ml	0/100 ml	100
Bacterias mesófilas(ufc)	250	70	500 (32)	72

CU = unidades de color; ntu = número de unidades de turbidez; ppm = partes por millón; NMP = número más probable; ufc = unidades formadoras de colonia; ND = no detectable por el método utilizado.

La masa de metal se calcula multiplicando la concentración de hierro o manganeso por el volumen de agua tratada, ésto se hace para cada corrida en cada etapa experimental, el valor que se reportó como resultado final es un promedio en el rango de diámetros de partícula (0.6-1.18 mm) y alturas de lecho filtrante (0.4-0.8 m) utilizados, que se expresa como miligramos de hierro o manganeso depositados por pie cúbico de lecho filtrante.

Estos cálculos se hacen considerando que la filtración del agua proveniente de las etapas de aireación (familiarización, experimental y de verificación) es 100% efectiva y que todo el óxido es retenido por el filtro y no existen pérdidas en las tuberías, accesorios y en las paredes del tubo del filtro.

La tabla 9.12 muestra las cantidades de agua tratada y de hierro y manganeso removidos en los rangos de alturas de lecho filtrante y tamaños de partículas utilizados en el proceso de filtración.

Los valores de la fila llamada sub total corresponden a las columnas que reportan hierro y manganeso depositados sobre el lecho filtrante durante las etapas de aireación, con el objeto de cargar de óxidos el filtro y provocar el efecto catalítico durante el posterior proceso de filtración.

TABLA 9.12

VOLUMEN DE AGUA TRATADA Y CANTIDAD DE HIERRO Y MANGANESO DEPOSITADOS
 SOBRE EL LECHO FILTRANTE EN CADA UNA DE LAS ETAPAS EXPERIMENTALES Y
 LA CANTIDAD DE METAL DEPOSITADO EN UN PIE³ DE LECHO FILTRANTE
 EN LOS RANGOS DE DIAMETROS DE PARTICULA (0.6-1.18 mm) Y ALTURAS DE LECHO FILTRANTE
 (0.4-0.8 m) UTILIZADOS EN ESTA INVESTIGACION

ETAPA EXPERIMENTAL	VOLUMEN DE AGUA TRATADA (L)	HIERRO DEPOSITADO (mg)	MANGANESO DEPOSITADO (mg)	mg DE METAL DEPOSITADO/PIE ³ DE LECHO FILTRANTE
Familiarización del proceso de aireación	2,043.90	2,856.120		Hierro
Experimental del proceso de aireación	2,043.90	33,333.480	16,183.400	
Verificación de resultados del proceso de aireación	454.20	552.530	299.020	152,424
Sub Total		36,742.130	16,482.420	
Experimental del proceso de filtración	1,810.80	4,721.317	7,691.000	Manganeso
Verificación de resultados del proceso de filtración	227.10	227.740	222.558	
Verificación de resultados en aguas de otros pozos:				
San Bartolo	151.40	88.950	257.380	79,999.34
Cuaya 6	151.40	37.093	95.880	
Sumatoria		78,559.360	41,231.658	

Según estos resultados la lava tiene una alta capacidad de adsorción de estos iones metálicos, sin haber dado muestras de agotamiento.

9.3.6 Pruebas de Regeneración del Lecho Filtrante

A los dos tamaños de partículas de lava se les realizó una serie de lavados con cuatro diferentes soluciones:

- A- Agua
- B- Acido clorhídrico al 4% v/v
- C- Hidrosulfito de sodio al 4% p/v
- D- Una combinación de las tres soluciones

Estos lavados se hicieron con el fin de determinar la mejor forma de llevar a cabo la limpieza de las partículas del lecho, teniendo en cuenta que es necesario dejar siempre cierta cantidad de película de óxido sobre la superficie del lecho filtrante (ver procedimiento de análisis en el anexo G).

Las características iniciales y finales de la piedra volcánica después de los lavados con las diferentes soluciones se observaron en el microscopio y se presentan en la tabla 9.13.

TABLA 9.13

CARACTERISTICAS DE LA PIEDRA RECUBIERTA CON OXIDO Y DESPUES DE CADA UNO DE LOS LAVADOS CON LAS DIFERENTES SOLUCIONES UTILIZADAS

C A R A C T E R I S T I C A S				
LAVA CON OXIDO	L A V A D O S			
	A G U A	A C I D O CLORHIDRICO	HIDROSULFITO DE SODIO	COMBINACION DE SOLUCION
Poseen muchas porosidades y rugosidades, alojan óxido en la superficie y en los poros internos.	Se observa óxido dentro de los poros y en la superficie de las partículas, se removió el exceso que había en la superficie.	En la mayoría de las partículas el lavado es total, únicamente algunas pocas presentan rastros de óxidos en su superficie y en los poros.	Se observa una pequeña cantidad de óxidos en casi todas las partículas, aunque hay algunas completamente limpias.	El lavado del óxido es heterogéneo, en algunas piedras la remoción es total, otras poseen cierta cantidad de óxidos.

9.4 EVALUACION ESTADISTICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

Para definir el comportamiento del sistema construido con cualquier combinación de variables independientes y sus respectivos niveles, se establecieron modelos matemáticos para los procesos de aireación y filtración.

En el proceso de aireación solamente se estableció un modelo matemático, el cual se obtuvo en base a los resultados de porcentaje de rendimiento en la remoción de hierro, ya que es este metal el que sufre mayor oxidación durante esta etapa del tratamiento (ver tabla 9.5), en la mayoría de casos en casi su totalidad, mientras que el manganeso se oxida en un bajo porcentaje, esto es lo que se esperaba según la teoría, por el pH de las aguas naturales que se utilizaron en esta investigación, la oxidación del hierro es más rápida que la del manganeso, razón por la cual se le dio mayor importancia a la oxidación del hierro durante la aireación. En el proceso de filtración es importante la remoción de ambos metales, ya que siendo la etapa final del tratamiento de las muestras de agua, éstas debían de presentar concentraciones de hierro y manganeso que cumplieran con la norma establecida o estén abajo de ésta, es por eso que se buscaron dos modelos matemáticos que predijeron el comportamiento del filtro para la remoción de hierro y manganeso, respectivamente.

El procedimiento estadístico utilizado para obtener las tres regresiones es el que se describe en la sección 7.4.1, el cual consistía en plantear los modelos matemáticos que tenían que pasar una serie de pruebas estadísticas para establecer su significancia, tales pruebas se aplicaron de acuerdo al orden establecido y se presentaron solamente los resultados que el programa de computación reportó.

Se examinaron un aproximado de quinientos modelos matemáticos en cada uno de los tres casos, el uso de la computadora permitió hacer este elevado número de evaluaciones rápidamente.

9.4.1 Evaluación Estadística de la Regresión

A. Establecimiento de la regresión entre las variables independientes y las variables respuesta.

Las tres regresiones seleccionadas para describir el comportamiento del sistema construido, que fueron obtenidas introduciendo los datos al programa de computación, son las siguientes:

i) Proceso de Aireación

$$\begin{aligned}
 Y_{CF_e} = & -975.080188 + 35.534397 X_1 + 304.01235 X_2 + \\
 & 17.647905 X_3 + 3.46822 X_4 - 9.244312 X_1 X_2 - \\
 & 0.649238 X_1 X_3 + 0.007378 X_1 X_4 - 4.876061 X_2 X_3 \\
 & - 1.175926 X_2 X_4 + 0.161402 X_1 X_2 X_3 \quad (9.1)
 \end{aligned}$$

Donde:

$Y_{c_{Fe}}$: % de rendimiento en la remoción de hierro.

X_1 : Tiempo de aireación (min).

X_2 : Diámetro de orificio (mm).

X_3 : Altura de agua (cm).

X_4 : Tiempo de reacción-sedimentación (min).

ii) Proceso de Filtración

$$Y_{c_{Fe}} : 134.708684 - 61.053369 X_1 - 0.286234 X_1 X_2 - \\ 39.10145 X_1 X_4 - 0.457303 X_2 X_4 + 1.441818 X_1 X_2 X_4 \quad (9.2)$$

$$Y_{c_{Mn}}^2 : 9.605.107554 + 949.032554 X_1^2 + 394.892446 X_4^2 \\ - 949.032554 (X_1 X_4)^2 \quad (9.3)$$

Donde:

$Y_{c_{Fe}}$: % de rendimiento en la remoción de hierro.

$Y_{c_{Mn}}$: % de rendimiento en la remoción de manganeso.

X_1 : Diámetro de partícula (mm).

X_2 : Altura del lecho (cm).

X_3 : Flujo de agua (gpm).

X_4 : Cloración (gramos de hipoclorito de calcio)/
Volumen de agua.

Las ecuaciones 9.1 y 9.2 se calcularon en base a la remoción de hierro durante las etapas de aireación

y filtración, respectivamente. La ecuación 9.3 predice el comportamiento del filtro en base a la remoción de Manganeso.

- B: Cálculo de los valores del porcentaje de rendimiento en la remoción de metal (Y_c) y de las desviaciones (D) por medio de la regresión anterior y de los valores experimentales de las variables involucradas (Y , X_1 , X_2 , X_3 y X_4).

La tabla 9.14 presenta los valores de Y_c y D para cada etapa de tratamiento, estos datos se calculan mediante la regresión seleccionada (ecuación 9.1, 9.2 ó 9.3) y la ecuación 7.5, respectivamente (ver sección 7.4.1., literal B).

- C. Cálculo de la correlación de los datos experimentales y de regresión.

Los valores de los coeficientes de correlación y de determinación para los tres grupos de datos de las dos etapas de tratamiento utilizadas en esta investigación se muestra en la tabla 9.15, estos fueron obtenidos para las ecuaciones 9.1, 9.2 y 9.3 por medio del programa de computación.

TABLA 9.14

VALORES DE PORCENTAJES DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE HIERRO O MANGANESO EXPERIMENTALES Y DE REGRESION Y DE LAS DESVIACIONES EN CADA UNA DE LAS CORRIDAS DE LAS DOS ETAPAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS UTILIZADAS EN ESTA INVESTIGACION.

CORRIDA	PROCESO DE AIREACION			PROCESO DE FILTRACION						
	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE HIERRO		DESVIACION (D)	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN REMOCION DE HIERRO		DESVIACION (D)	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN LA REMOCION DE MANGANESO		DESVIACION (D)	
	VALOR EXPERIMENTAL (Y)	VALOR DE REGRESION (Yc) (Ec.9.1)		VALOR EXPERIMENTAL (Y)	VALOR DE REGRESION (Yc) (Ec.9.2)		VALOR EXPERIMENTAL (Y)	VALOR DE REGRESION (Yc) (Ec. 9.3)		
1	50.82	50.821300	-0.00131760	92.09	91.951830	0.13817000	100.00	100.00	0.00	
2	77.78	77.766000	0.01425800	55.10	55.230000	-0.13000000	100.00	100.00	0.00	
3	45.07	45.070800	-0.00079660	99.20	96.530000	2.67000000	100.00	100.00	0.00	
4	64.30	64.301500	0.00147648	35.70	37.000000	-2.10000000	100.00	100.00	0.00	
5	83.62	88.301200	-4.68000000	38.72	37.800000	0.92000000	100.00	100.00	0.00	
6	75.00	75.00050519	-0.00050519	52.76	51.430000	1.33000000	100.00	100.00	0.00	
7	91.85	87.0002901	4.84970990	87.88	87.320000	0.56000000	100.00	100.00	0.00	
8	88.85	88.8503237	0.00032370	100.00	94.570000	5.43000000	95.37	94.83	0.54	
9	74.30	74.3006443	0.00064430	93.60	96.538137	-2.93813700	100.00	100.00	0.00	
10	77.75	77.765742	-0.15742000	55.10	55.230000	-0.13000000	100.00	100.00	0.00	
11	85.87	85.8707726	-0.00077260	90.14	87.760000	2.38000000	-	-	-	
12	64.30	65.300262	-0.00026210	86.48	94.570000	-8.09000000	94.29	94.83	0.54	
SUMATORIA DE LAS DESVIACIONES			0.01716101				0.17668503			0.00

TABLA 9.15
 COEFICIENTES DE CORRELACION Y DE DETERMINACION ENTRE LOS
 VALORES EXPERIMENTALES (Y) Y LOS VALORES DE
 REGRESION (Yc) DE LAS DOS ETAPAS DE TRATAMIENTO DE
 AGUAS UTILIZADAS EN ESTA INVESTIGACION

ETAPA DE TRATAMIENTO	COEFICIENTE DE CORRELACION (r)	COEFICIENTE DE DETERMINACION (r ²)
<u>AIREACION</u>		
Remoción de hierro	1	1
<u>FILTRACION</u>		
Remoción de hierro	0.99045	0.98099
Remoción de manganeso	0.994089533	0.988214

El modelo matemático planteado para el proceso de aireación explica la relación entre variables para un 100% de las muestras, mientras que para la filtración, la regresión basada en la remoción de hierro explica dicha relación entre variables para un 98% de las muestras y el tercer modelo (basado en la remoción de manganeso) representa al 98% de las muestras.

D. Evaluación de la significancia estadística de la correlación.

En el literal D del procedimiento de pruebas estadísticas se establece que para definir el valor del coeficiente de correlación obtenido de tabla, se deben de conocer los grados de libertad, los cuales se

calculan mediante la ecuación 7.9, la tabla 9.16 muestra los grados de libertad para cada una de las tres regresiones.

TABLA 9.16
GRADOS DE LIBERTAD PARA CADA UNA DE LAS TRES
REGRESIONES SELECCIONADAS EN ESTA INVESTIGACION

Grados de Libertad = $n-m$ (ecuación 7.9)			
Donde: n = número de corridas experimentales y m = número de variables independientes			
ETAPA DE TRATAMIENTO	n	m	GRADOS DE LIBERTAD
<u>AIREACION</u>			
Remoción de hierro (ecuación 9.1)	12	4	8
<u>FILTRACION</u>			
Remoción de hierro (ecuación 9.2)	12	4	8
Remoción de manganeso (ecuación 9.3)	11	4	7.

A continuación se muestran los coeficientes de correlación de tabla para 7 y 8 grados de libertad a diferentes niveles de significancia (ver tabla en anexo D).

TABLA 9.17
VALORES DE COEFICIENTES DE CORRELACION DE TABLA PARA 7 Y 8 GRADOS
DE LIBERTAD A NIVELES DE SIGNIFICANCIA DEL 5% Y 1% (53)

NIVEL DE SIGNIFICANCIA	COEFICIENTE DE CORRELACION DE TABLA	
	GRADOS DE LIBERTAD	
	7	8
5%	0.6021	0.6319
1%	0.7348	0.7646

Comparando los valores de r calculado y de tabla para las tres regresiones, el primero es mucho mayor que el segundo, por lo tanto las correlaciones entre los valores experimentales (Y) y los de regresión (Y_c) son altísimamente significantes.

E. Evaluación estadística de las regresiones

E.1 Análisis de varianza

Los valores de F , calculados con la ecuación 7.10 mediante el programa de computación STATGRAPHIC, se muestran en la tabla 9.18.

TABLA 9.18

VALORES DE DISTRIBUCION DE FISHER CALCULADOS A PARTIR DE LOS VALORES EXPERIMENTALES (Y) Y DE REGRESION (Y_c) PARA CADA UNO DE LOS TRES GRUPOS DE RESULTADOS Y LOS VALORES DE TABLA A NIVELES DE SIGNIFICANCIA DEL 5% Y 1% PARA CADA UNA DE LAS REGRESIONES (53)

ETAPA DE TRATAMIENTO	GRADOS DE LIBERTAD DEL ERROR		$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{crítico}}$	
	k	n - (k+1)		NIVEL DE SIGNIFICANCIA	
				5%	1%
<u>AIREACION</u>					
Remoción de hierro (ecuación 9.1)	10	1	515.675	2.042	8.75
<u>FILTRACION</u>					
Remoción de hierro (ecuación 9.2)	5	6	61.9231	4.39	8.75
Remoción de manganeso (ecuación 9.3)	3	7	195.64	4.35	8.45

k : número de variables de regresión (variables independientes más interacciones).

Los valores de $F_{\text{calculado}}$ son mucho mayores que los de $F_{\text{crítico}}$ por lo tanto las regresiones planteadas son altísimamente significantes.

E.2 Nivel de Significancia Mínimo (P)

El nivel de significancia mínimo debe de ser menor que el nivel del 1% ($\alpha = 0.01$) ya que $F_{\text{calculado}}$ es mayor que $F_{\text{crítico}}$ al 1% del nivel de significancia (ver sección 7.4.1, literal E, numeral 2), ésto sucede para los tres grupos de datos.

Las regresiones entre F y el nivel de significancia (α) obtenidas para calcular el nivel de significancia mínimo a partir de $F_{\text{calculado}}$ son los siguientes:

i) Proceso de aireación

a) Remoción de hierro

$$\log \alpha = -0.110914932 - 0.499402621 \log F \quad (9.4)$$

ii) Proceso de filtración

a) Remoción de hierro

$$\log \alpha = -0.504807222 - 0.174634042 \log F \quad (9.5)$$

b) Remoción de manganeso

$$\log \alpha = 0.130509284 - 2.276307084 \log F \quad (9.6)$$

los valores de nivel de significancia mínimo calculado mediante cada una de las regresiones anteriores, a partir del valor de $F_{\text{calculado}}$ se muestran en la tabla 9.19.

TABLA 9.19
 VALORES DE NIVEL DE SIGNIFICANCIA MINIMO (P)
 CALCULADOS A PARTIR DE LAS REGRESIONES ENTRE
 NIVEL DE SIGNIFICANCIA Y LA DISTRIBUCION DE
 FISHER (F) EN CADA UNA DE LAS ETAPAS DE
 TRATAMIENTO DE AGUAS UTILIZADAS EN LA INVESTIGACION

ETAPA DE TRATAMIENTO	REGRESION	P
<u>AIREACION</u>		
Remoción de hierro	Ecuación 9.4	0.0011
<u>FILTRACION</u>		
Remoción de hierro	Ecuación 9.5	0.0000
Remoción de manganeso	Ecuación 9.6	0.0000

En conclusión, los valores de P son muchos menores que el nivel de significancia del 1% (0.01), por lo tanto las regresiones representadas por las ecuaciones 9.1, 9.2 y 9.3 son útiles y altamente significativas.

F. Evaluación de la capacidad de predicción de la regresión.

La sumatoria de las desviaciones entre los valores experimentales (Y) y los de regresión (Yc) para los tres grupos de resultados obtenidos, se presentan en la tabla 9.20.

TABLA 9.20
VALORES DE LA SUMATORIA DE LAS DESVIACIONES PARA CADA
UNO DE LOS TRES GRUPOS DE RESULTADOS
OBTENIDOS EN LA INVESTIGACION

ETAPA DEL TRATAMIENTO	SUMATORIA DE LAS DESVIACIONES (ΣD)
<u>AIREACION</u>	
Remoción de hierro	0.01716101
<u>FILTRACION</u>	
Remoción de hierro	0.17668503
Remoción de manganeso	0.00000000

Al observar los resultados de la tabla 9.20, el valor de sumatoria de las desviaciones correspondientes a la remoción de hierro en el proceso de aireación es próximo a cero. En el caso de la filtración, para la remoción de hierro, este valor es alto, sin embargo, se puede considerar cercano a cero en comparación con el resultado de otras regresiones examinadas ya que con ellas se obtuvieron valores de ΣD hasta de 13, para la remoción de manganeso el valor ΣD es igual a cero. Se concluye que las tres regresiones tienen una alta capacidad de predicción.

X. EVALUACION ECONOMICA

En este capítulo se presenta la evaluación económica del sistema semi-piloto diseñado y construido para determinar la capacidad de la piedra volcánica (lava negra) de retener los óxidos e hidróxidos férricos y mangánicos, previamente formados en un proceso de aireación por difusión, para que éstos puedan posteriormente favorecer la autocatálisis de los iones ferrosos y manganosos remanentes sobre la superficie de exposición que presenta la lava volcánica en el filtro.

La evaluación económica tiene como objetivo presentar el costo del sistema construido y los costos de producción por metro cúbico de agua tratada en éste. Razón por la cual se realiza tomando en cuenta algunos aspectos de:

1. La inversión fija de capital.
2. El costo de producción.

10.1 INVERSION FIJA DE CAPITAL

Es el desembolso necesario para realizar la construcción y puesta en marcha de un equipo o proceso (58).

Dentro de la inversión fija solamente se han considerado los siguientes gastos:

1. Directos

- a) Material de Construcción
- b) Mano de obra de construcción

Se presenta en función de las horas trabajadas por hombre, pero incluye todos los gastos relacionados con la construcción del equipo.

- c) Preparación del lecho filtrante

Se refiere a los gastos de: operario, energía eléctrica y depreciación de equipo en la reducción de tamaño y esterilización de la piedra volcánica.

- d) Equipo

Se refiere a los costos del compresor, bomba y manómetros.

- e) Instalación y puesta en marcha

Se refiere a las horas de trabajo por hombre, requeridos para instalar el sistema y asegurar el correcto funcionamiento.

2. Indirectos

- a) Imprevistos

Se calcula como el 10% del total de los costos directos (59).

En las tablas 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4 se presenta el detalle de cada uno de los gastos directos considerados en la inversión fija de capital.

En la tabla 10.5 se presenta la inversión fija de capital o costo total del sistema construido.

10.2 COSTOS DE PRODUCCION

Los costos de producción son los costos que inciden directamente en la producción, y son calculados sobre la base de un período de operación determinado (59).

En el sistema construido, como costos de producción se consideran únicamente los costos de: hipoclorito de calcio y energía eléctrica; los cuales, se calculan en base a un período de trabajo del sistema, de 3.5 días, que equivalen a una producción de agua de 1.06 m^3 , considerando 8 horas de trabajo por día.

Es importante mencionar, que los costos de producción han sido determinados a las condiciones de trabajo, tanto del aireador como del filtro, con las cuales se obtuvieron los mejores resultados en las pruebas experimentales (ver tablas 9.2 y 9.7)

En el anexo F, se presentan las condiciones de trabajo del sistema utilizadas en la determinación de los costos de producción; también se presentan los cálculos realizados y las consideraciones hechas.

Los costos de producción se expresan por metro cúbico de agua producida.

TABLA 10.1
COSTO POR MATERIAL DE CONSTRUCCION *

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO ¢	VALOR ¢
TUBERIA Y ACCESORIOS PVC			
Unión de 1/2"	3	1.33	3.99
Adaptador hembra de 1/2"	4	1.78	7.12
Te lisa de 1/2"	10	2.44	24.40
Te rosca de 1/2"	1	3.22	3.22
Codo 90° liso de 1/2"	14	1.89	26.46
Codo 90° rosca de 1/2"	1	2.56	2.56
Adaptador macho de 1/2"	20	1.33	26.60
Tapón macho de 1/2"	2	2.55	5.10
Crucero liso de 1/2"	2	6.90	13.80
Tubería de 1/2"	12	3.63	43.56
Tubería de 6"	3	186.00	558.00
Tapón hembra rosca de 6"	1	125.00	125.00
			839.81
MATERIAL PLASTICO			
Recipiente cilíndrico	1	100.00	100.00
Manguera de 3/4"	7	4.65	32.55
			132.55
VALVULAS			
Válvula de chorro	1	12.50	25.00
Válvula de compuerta	4	15.00	60.00
Válvula de globo	2	16.50	33.00
Válvula de bola	2	48.00	96.00
			214.00
MATERIALES PARA ACABADO			
Pegamento epoxi-mil 201-J	8	20.00	160.00
Pegamento epoxi-glue #908	3	18.95	56.85
Pegamento tangit para PVC	5	7.00	35.00
Lija de agua	3	7.00	35.00
			286.85
OTROS			
Sierra de acero	1	6.75	6.75
Reductor bushing de 2 1/2"	2	3.50	7.00
Reductor bushing de 1/2-1/8"	2	2.00	4.00
Abrazaderas de pared	4	2.50	10.00
Abrazaderas para mangueras	10	3.50	35.00
Distribuidor ducha	1	15.00	15.00
Pernos 3/8 x 1 1/2"	24	0.85	20.40
Arandelas	24	0.20	4.08
Alambre de amarre (1b)	1	2.50	2.50
			104.73
T O T A L			1.577.94

*Información obtenida en establecimientos comerciales en marzo de 1992.

TABLA 10.2
COSTO DE PREPARACION DE 50 kg DE PIEDRA VOLCANICA

PROCESO	OPERARIO			ENERGIA ELECTRICA			DEPRECIACION			TOTAL
	h/HOMBRE	COSTO ¢/h	VALOR ¢	h/HOMBRE	CONSUMO kW/h	VALOR ¢	h/HOMBRE	DEPRECIACION ¢/h	VALOR ¢	
Trituración	1.5	6.60	9.90	1.5	10	15	1.5	0.57	0.86	25.76
Pulverizado	1	6.60	6.60	1	10	10	1	0.57	0.57	17.17
Tamizado	6.5	6.60	42.90	3.25	4.65	15.11	3.25	0.75	2.44	60.45
Esterilización	10	6.60	66.00	10	5.25	52.50	10	0.6	6.00	124.50
TOTAL			125.40			92.61			9.87	227.88
TRANSPORTE										100.00
TOTAL										327.88

NOTA: Los datos que se presentan en esta tabla, fueron proporcionados por el Instituto de Investigaciones Tecnológicas (Geotécnico), del Ministerio de Obras Públicas.

TABLA 10.3

GASTOS DE CONSTRUCCION E INSTALACION Y PUESTA EN MARCHA

CONSTRUCCION	HORAS TRABAJADAS POR HOMBRE	COSTO ¢/h	VALOR ¢
Mano de obra de construcción (57)			
Distribuidor	5	7.50	37.50
Aireador	3	7.50	22.50
Filtro	80	11.25	900.00
Instalación y puesta en marcha			
Mano de obra	8	7.50	60.00
T O T A L			1,020.00

TABLA 10.4

COSTO DEL EQUIPO EMPLEADO EN LA INVESTIGACION

E Q U I P O	VALOR ¢
Compresor *	1,275.00
Bomba principal (60)	2,160.00
Bomba auxiliar (60)	832.00
Manómetros (3 unidades)*	180.00
T O T A L	4,447.00

* Información obtenida en establecimientos comerciales en marzo de 1992.

TABLA 10.5
INVERSION FIJA DE CAPITAL DEL SISTEMA CONSTRUIDO

P A R T I D A	INVERSION ₡
Costo por material de construcción	1,577.94
Preparación del lecho filtrante	327.88
Gastos de construcción e instalación y puesta en marcha	1,020.00
Costo del equipo	<u>4,447.00</u>
Sub Total	7,372.82
Imprevistos (10% del sub-total)	<u>737.28</u>
Total (inversión fija de capital)	8,110.10

10.2.1 Costo de Hipoclorito de Calcio

El hipoclorito de calcio al 65% es el único producto químico utilizado en el sistema construido para la remoción de hierro y manganeso. La cantidad de este producto químico utilizada para producir 1.06 m^3 de agua fue de 14 gramos. En 3.5 días de trabajo de 8 horas cada uno, se realizaron 14 corridas con una producción de agua de 0.0757 m^3 (20 gal)/corrida. Se adicionó 1 g de hipoclorito de calcio al 65% por cada 0.0757 m^3 (20 gal) de agua (ver anexo F).

Considerando que el precio de este producto químico es de ₡17/lb, el gasto en hipoclorito de calcio por metro cúbico producido es de ₡0.49.

10.2.2 Costo de Energía Eléctrica

Se refiere a la cantidad de energía eléctrica consumida por las bombas y compresor utilizados en el sistema construido, para producir 1.06 m^3 de agua.

Se calcula en base a los kilowatts de energía eléctrica consumidos en las horas trabajadas por estos equipos.

En la tabla 10.6 se presenta el resumen del cálculo del costo de energía eléctrica consumida por los equipos utilizados, por el sistema construido, para la producción de 1.06 m^3 de agua.

En el anexo F se presenta la descripción de los pasos y cálculos realizados en la determinación del costo de energía eléctrica.

TABLA 10.6

DETERMINACION DE LA ENERGIA ELECTRICA TOTAL CONSUMIDA POR EL SISTEMA PARA LA PRODUCCION DE 1.06 m^3 DE AGUA

EQUIPO	TIEMPO DE TRABAJO (h)	ENERGIA CONSUMIDA kW*	ENERGIA TOTAL CONSUMIDA kWh	COSTO DE LA ENERGIA CONSUMIDA ¢
Compresor	11.66	0.8200	9.56	3.59
Bomba 1	4.23	0.7552	3.20	1.18
Bomba 2	3.40	0.0782	0.27	0.10
Costo de energía eléctrica total consumida				4.82

* Precio de energía eléctrica ¢0.37/ kWh

El costo total para la producción de 1 m^3 de agua se presenta en la tabla 10.7.

TABLA 10.7
 COSTO DE PRODUCCION TOTAL POR m^3 DE AGUA

C O N C E P T O	COSTO ¢ / m^3
Hipoclorito de calcio	0.49
Energía eléctrica	4.82
Costo de producción total	5.31

En esta evaluación económica no se presenta el costo del agua producida por el sistema, debido a que no fue posible determinar la máxima concentración de Fe y Mn que el filtro remueve antes de agotarse; información que permite calcular el volumen de agua producida y el costo de ésta. Razón también por la cual los costos de producción se calculan en base a una producción de agua de $1 m^3$.

XI. DISCUSION DE RESULTADOS

11.1 MUESTREO

Durante la etapa de muestreo, al realizar los análisis físicoquímicos y bacteriológicos al agua de los diferentes lugares, se determinaron algunas características generales: el pH típico de las aguas naturales oscila entre 6.9 y 7.5, es decir aproximadamente neutro.

Resulta evidente que el ácido sulfhídrico presente en todas las muestras, acompaña siempre al hierro y al manganeso, impartiendo al agua un olor desagradable aún cuando su concentración sea relativamente baja (2.5-6.5 ppm de H_2S). Todas las muestras están fuera de la norma respecto a este compuesto, pues en ellas el olor característico es perceptible. Su presencia puede deberse a la acción bacteriana, detectada en los análisis microbiológicos al encontrarse bacterias coliformes totales sobre la materia orgánica que también es abundante en todas las muestras (4.1-9.1 ppm $KMnO_4$). El agua de los sitios estudiados se caracterizaba por ser de una apariencia desagradable (con material coloidal, sucia y con crecimiento microbiológicos en los lugares de toma de muestra).

De acuerdo con los resultados de los análisis microbiológicos se estableció la presencia de actividad bacte-

riana, pues en seis de los siete lugares muestreados se encontraron organismos coliformes totales que indican presencia de contaminación, únicamente el agua proveniente del pozo de la fábrica Eureka puede clasificarse como no contaminada, por lo que puede decirse que en forma general las aguas provenientes de pozos deben ser sometidas a procesos de desinfección, ya que se encuentran fuera de las normas para agua de calidad potable.

La materia orgánica y los compuestos azufrados son los que posiblemente en alguna medida interactúan con las especies de Fe originando los quelatos o complejos de este metal presentes en todas las muestras analizadas (0.1-0.45 ppm de Fe acomplexado).

Por otro lado los compuestos de Fe y Mn se hallan presentes en todas las muestras, aunque en concentraciones muy diversas que varían a lo largo del tiempo aún cuando se trate del mismo abastecimiento.

El hierro total varía entre 0.27 y 1.97 ppm, encontrándose en 4 de los 7 lugares, una mayor concentración de Fe oxidado en comparación con el soluble que se halla en menor proporción. Como ya se mencionó otra manifestación de Fe es la forma de quelatos aunque en cantidades relativamente bajas.

El Fe soluble varía desde valores muy bajos, no detectables por el método utilizado, hasta 1.01 ppm, el Fe oxi

dado o insoluble oscila entre 0.14 y 1.63 ppm. El manganeso total se halla en el rango de 0.24 a 1.25 ppm, como especie soluble varía de 0.24 a 0.98 ppm y como insoluble está presente en cantidades que van desde 0 hasta 0.54 ppm, forma que generalmente es inferior comparada con los compuestos solubles. Al comparar las especies totales de Fe y Mn entre sí puede mencionarse que únicamente en San Bartolo el Mn es mucho mayor que el Fe (1.23 ppm Mn y 0.39 ppm de Fe), en San Juan Opico y el Hogar Divina Providencia el Fe es superior al Mn (aproximadamente el doble), mientras que en los cuatro lugares restantes el manganeso se halla en menor cantidad en comparación con el hierro.

Respecto a los compuestos solubles en la mayoría de lugares las concentraciones tanto del Fe como del Mn son ligeramente diferentes entre sí.

11.2 SELECCION DEL LUGAR DE TRABAJO

La selección del lugar de trabajo se realizó basándose en las concentraciones de Fe y Mn presentes en el agua. No fue posible trabajar con concentraciones de Fe solubles superiores a las de manganeso, condición que hubiese permitido evaluar el efecto de los dos procesos unitarios involucrados sobre cada una de estas especies, ya que teóricamente todo el Fe se oxidaría completamente en el aireador y produciría suficiente material con capacidad adsortiva para retener iones manganosos, los cuales serían afectados

en una mínima parte en la etapa de aireación, siendo la filtración la operación en la cual hubiesen sido eliminados por catálisis de ión férrico y autocatálisis de iones mangánicos. Sin embargo, el agua seleccionada fue la de Guluchapa donde las concentraciones de ambos elementos son altas y similares entre sí, pudiéndose determinar de esta forma la proporción en que cada uno de estos elementos sería afectado en ambos procesos.

Las concentraciones del agua de trabajo seleccionada son:

1.15 ppm Fe total	(1.01 ppm Fe soluble)
1.25 ppm Mn total	(0.98 ppm Mn soluble)

Un elemento decisivo fue también la accesibilidad a tal sitio, además se contó con la colaboración de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) para instalar en ese lugar el equipo construido y tener facilidad para la extracción del agua, a fin de minimizar el efecto oxidativo al entrar ésta en contacto prolongado con el aire atmosférico pues aunque siempre fue necesario transportar el agua, la distancia y tiempo empleados fueron muy cortos.

11.3 EXPERIMENTACION

11.3.1 Proceso de Aireación

En la etapa experimental de aireación, los mejores porcentajes de rendimiento obtenidos corresponden a la oxi

dación del hierro (ver tabla 9.11), razón por la cual se considera que la parte del sistema semi-piloto construída para realizar el proceso de aireación por difusión ejerce mayor efecto en la oxidación del hierro que en la de manganeso; resultado que se atribuye al pH del agua subterránea utilizada para realizar la experimentación (pH promedio del agua cruda utilizada: 6.7), y a la alta concentración de oxígeno existente debido al gran exceso agregado, ya que el Mn no es dependiente del oxígeno y pH.

En la tabla 11.1, se presenta los 3 mejores porcentajes de rendimiento de la oxidación del Fe^{+2} y Mn^{+2} obtenidos en el proceso de aireación (resultados extraídos de la tabla 9.1).

TABLA 11.1
MEJORES RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE AIREACION

CORRIDA	% DE RENDIMIENTO EN LA OXIDACION DE Fe^{+2}	CORRIDA	% DE RENDIMIENTO EN LA OXIDACION DE Mn^{+2}
5	100.00 %	2	64.92
7	91.85 %	11	50.00
11	85.87 %	1	33.34

Los porcentajes de rendimiento obtenidos en la etapa experimental de aireación (ver tabla 9.1) no permiten determinar qué niveles de las variables independientes seleccionadas (tiempo de aireación, diámetro de orificio, altura de agua y tiempo de reacción y sedimentación) ejercen

efecto significativo en la oxidación del hierro y/o manganeso, ya que los mejores porcentajes de rendimiento, tanto para la oxidación del Fe^{+2} como para la del Mn^{+2} , han sido obtenidos en corridas cuya combinación de niveles no permite ninguna relación entre ellas, resultado que básicamente es el mismo para las 12 corridas realizadas; sin embargo la regresión establecida para el proceso de aireación por difusión (ver tabla 9.17, ecuación 9.1), demuestra que las cuatro variables independientes seleccionadas y la interacción entre ellas ejerce efecto significativo en la oxidación del Fe^{+2} y menor efecto sobre el Mn^{+2} , por lo que se considera que los altos porcentajes de oxidación de Fe^{+2} obtenidos en este proceso se deben al efecto que ejercen combinaciones de niveles específicas de las 4 variables independientes y al efecto de las posibles interacciones entre los niveles de estas variables.

Para realizar la etapa de verificación de resultados, se seleccionó la corrida experimental que presentó el mayor porcentaje de rendimiento en la oxidación del Fe^{+2} , esto debido a que según la bibliografía consultada, el proceso de aireación ejerce mayor efecto en la oxidación de este elemento, lo cual ha sido demostrado en este trabajo de graduación. La corrida seleccionada fue la número 5 con un porcentaje de rendimiento en la oxidación de Fe^{+2} y Mn^{+2} de 100% y 27.5%, respectivamente.

Los resultados de las pruebas realizadas en la etapa de verificación de resultados (ver tabla 9.3), comparado con el obtenido para la corrida 5 en la etapa de experimental, muestra una disminución en el porcentaje de rendimiento de la oxidación del Fe^{+2} (83.62%) y un incremento en el porcentaje de oxidación del Mn^{+2} (40%), sin embargo la cantidad de Fe^{+2} y Mn^{+2} oxidados en esta etapa son 1.27 y 2.18 veces, mayores que la oxidación en la etapa experimental (ver tabla 9.4).

Se supone que estos resultados se deben a que la concentración de Fe y Mn del agua cruda utilizada en la etapa de verificación es 1.5 veces mayor que la utilizada en la etapa experimental. También se considera que el incremento en el porcentaje de oxidación del Mn^{+2} obtenido en esta etapa se debe a que el Fe y Mn oxidados por la aireación proporcionada ha favorecido la autocatálisis de los iones manganosos y la catálisis del Fe^{+3} en forma de óxidos.

11.3.2 Proceso de Filtración

Los resultados obtenidos en el proceso de filtración que se presentan en la tabla 9.5 muestran que los mejores porcentajes de rendimiento en la remoción de Fe^{+2} (99.20%, 93.55% y 90.15%) se obtienen en corridas experimentales (3, 9 y 11) en las cuales se tiene el menor tamaño de partículas (0.6 mm) y la mayor altura de lecho filtrante

(0.8 m), correspondiendo los mayores porcentajes de rendimiento (99.20% y 93.55%) a las corridas (6 y 9) donde se realizó la adición del hipoclorito de calcio al 65%.

También se observa que en general la adición del hipoclorito de calcio incrementa los porcentajes de rendimiento de las otras combinaciones de niveles establecidas en las corridas experimentales.

Se considera que los altos porcentajes de rendimientos obtenidos en las corridas experimentales donde se efectúa la adición del hipoclorito de calcio se debe a que este producto químico participa en la oxidación del Fe^{+2} y Mn^{+2} , ya que es un oxidante más fuerte que el oxígeno.

Con respecto a la variable independiente Flujo de Agua no se observa efecto significativo en ninguno de los niveles de trabajo, ya que tanto para el nivel positivo (1.4 gal/min) como para el negativo (0.7 gal/min) se tienen buenos porcentajes de remoción, se considera que ésto se deben al efecto que ejerce el menor tamaño de partículas, la mayor altura de lecho filtrante y la adición del hipoclorito de calcio.

Al comparar los resultados anteriormente descritos con la regresión encontrada para la remoción de hierro en el proceso de filtración (ver tabla 9.17, ecuación 9.2), se observa que en efecto, las variables independientes que ejercen mayor influencia en la remoción de este elemento

son: diámetro de partículas, altura de lecho filtrante y cloración, además de todas las posibles interacciones dobles y triples entre ellas.

Con respecto a la remoción de Mn, el proceso de filtración fue en términos generales excelentes, ya que de las 12 corridas realizadas, para 10 se obtuvieron porcentajes de remoción de Mn de 100% y para las otras dos restantes los porcentajes de remoción aunque fueron menores de 100% son altos (95.37% y 86.33%).

Estos altos y cercanos porcentajes de rendimiento obtenidos, no permiten determinar qué variables independientes ejercen efecto significativo en la remoción de Mn, no obstante la regresión establecida para este fin (ecuación 9.3), muestra que en el proceso de filtración las variables independientes que ejercen mayor efecto en la remoción de Mn son: diámetro de partícula y cloración.

Debido a que los porcentajes de remoción de Mn, en todas las corridas realizadas han sido elevados, para realizar la etapa de verificación se seleccionó la corrida experimental (corrida 3) que presentó el mayor porcentaje de rendimiento en la remoción de Fe^{+2} (99.20%), obteniéndose en términos generales un comportamiento uniforme o constante del filtro para ambos elementos, ya que aunque para el Fe los porcentajes de remoción obtenidos en esta etapa, son diferentes, éstos son muy cercanos entre sí y proporcionan

un porcentaje promedio igual al de la etapa experimental (99.20%). Para el Mn en las tres pruebas de verificación realizadas se obtiene el mismo porcentaje de remoción (100%), el cual es igual al obtenido en la etapa experimental.

Es importante mencionar que las condiciones de trabajo de la corrida tres (corrida experimental con la cual se realizó la etapa de verificación), son las esperadas, según la bibliografía consultada, para obtener en el proceso de filtración los mayores porcentajes de rendimiento en la remoción de Fe y Mn; siempre y cuando el agua cruda de trabajo haya recibido un tratamiento previo y adecuado de oxidación.

11.3.3 Diferentes Tipos de Agua

Las pruebas experimentales con otros tipos de agua (ver tabla 9.10), muestran en términos generales un comportamiento eficiente del sistema construido; ya que el Mn ha sido eliminado completamente de las diferentes aguas subterráneas en estudio, el Fe aunque presenta diferentes porcentajes de remoción, ha sido reducido a concentraciones menores que los límites máximos, más rigurosos, permisibles por las normas de calidad.

La mayor eficiencia del sistema construido se obtiene cuando el agua cruda de trabajo posee concentraciones al-

tas y similares de Fe y Mn, tal es el caso del pozo 34 de Guluchapa, donde se han obtenido porcentajes de rendimientos globales en la remoción de Fe y Mn de 99.42% y 100% respectivamente (ver tabla 9.10).

Se asume que el 0.58% de Fe no removido se debe a la presencia de materia orgánica en el agua tratada (7.1 ppm de KMnO_4) ya que esta forma compleja con el Fe que no pueden ser eliminados por el proceso de aireación y filtración proporcionados.

Para aguas crudas con un contenido de Mn mayor que el Fe (ver pozo San Felipe de la tabla 9.10), se observa, en comparación con el caso anteriormente mencionado (pozo 34 de Guluchapa), que la eficiencia del sistema construido disminuye para la remoción de Fe (90.15%), siendo más notoria la disminución de este elemento en la medida que la concentración de Fe y Mn en el agua cruda disminuye, caso que coincide con el agua del pozo Cuaya 6, el cual presentó un porcentaje global de remoción de Fe, de 68%; sin embargo es importante dejar en claro que la disminución de eficiencia de remoción Fe obtenida en las aguas del pozo San Felipe y Cuaya 6, es únicamente en comparación con la eficiencia obtenida en las aguas del pozo 34 de Guluchapa y no con respecto a la calidad del agua en lo referente al contenido de Fe, ya que la concentración de este elemento en el agua tratada de los pozos San Felipe (0.06125 ppm de

Fe) y Cuaya 6 (0.1 ppm de Fe) es menor o igual que la concentración máxima de Fe permisible por las normas de calidad (0.1 ppm de Fe).

En la tabla 11.2, se presentan las concentraciones de Fe y Mn en el agua cruda y tratada de los pozos: 34 de Guluchapa, San Felipe y Cuaya 6; también se presentan los porcentajes de rendimientos globales de remoción de Fe y Mn obtenidos para estos pozos (resultados extraídos de la tabla 9.10).

TABLA 11.2
RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES
DEL SISTEMA CONSTRUIDO CON OTROS TIPOS DE AGUA

LUGAR	AGUA CRUDA		AGUA TRATADA		% DE RENDIMIENTO GLOBAL EN LA REMOCION DE METAL			
	ppm Fe _t	ppm Mn _t	ppm Fe _t	ppm Mn _t	Y _{Fe}	% Fe	Y _{Mn}	% Mn
Guluchapa	1.4	1.5	0.00808	0		99.42		100
San Felipe	0.625	1.5	0.06125	0		92.20		100
Cuaya 6	0.3125	0.6333	0.1	0		68.00		100

Fe_t : Concentración de hierro total en ppm.

Mn_t : Concentración de manganeso total en ppm.

Y_{Fe} : Porcentaje de rendimiento global en la remoción de Fe.

Y_{Mn} : Porcentaje de rendimiento global en la remoción de Mn.

Aunque no fue posible realizar pruebas experimentales en aguas con alto contenido de Fe y bajo Mn, por los resultados obtenidos, se considera que el sistema funcionará

eficientemente en la remoción de Fe y Mn para fines potables.

También en los resultados de las pruebas experimentales con otros tipos de agua se observa, al igual que en la etapa experimental, que el proceso de aireación del sistema construído ejerce mayor efecto en la oxidación del Fe que en la de Mn, ya que aunque el porcentaje de rendimiento de la oxidación del Fe disminuye en las aguas crudas con bajo contenido de este elemento, la cantidad de Fe oxidada siempre es mayor que la del manganeso (ver tabla 9.10).

Con respecto al manganeso, se observa que en aguas con concentraciones altas y similares de Fe y Mn (Pozo 34 de Guluchapa), el porcentaje de oxidación de este elemento es del 40%, el cual disminuye a 34.3% en aguas crudas con alto Mn y bajo Fe (Pozo San Bartolo-San Felipe) posiblemente debido a que hay una menor cantidad de hierro oxidado para favorecer la autocatálisis de los iones manganesos; caso contrario y disparado se presenta en aguas crudas con alto Mn y bajo Fe en concentraciones menores a la anterior (Pozo Cuaya 6), ya que se obtuvo un porcentaje de oxidación de Mn, de 56.15%; mayor que el de los dos casos anteriores. Se considera que este último resultado se debe a problemas en el análisis químico realizado.

El proceso de filtración del sistema construído en las pruebas experimentales con otros tipos de agua, muestra un comportamiento excelente del lecho filtrante en la remoción de Mn, no así para el Fe, cuya eficiencia de remoción depende de la concentración de este elemento en el agua cruda de trabajo.

Aunque los resultados obtenidos muestran que la eficiencia de retención de Fe del lecho filtrante disminuye en aguas crudas con bajas concentraciones de este elemento, se considera que la piedra volcánica es eficiente en la remoción de este metal ya que las concentraciones no removidas, como se mencionó anteriormente, están abajo de los límites máximos permisibles por las normas de calidad, además se considera que las concentraciones no removidas se debe a que el Fe se encuentra en forma acomplexada no pudiendo ser eliminado por el tratamiento proporcionado y produciendo porcentajes de retención de acuerdo a la concentración de este elemento en el agua cruda.

11.4 EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

Una última corrida experimental fue llevada a cabo para coleccionar muestras que fueron sometidas a una serie de análisis físico-químicos y bacteriológicos con el fin de evaluar la calidad del agua tratada con respecto al agua cruda, tomando en consideración los límites máximos permi-

sibles establecidos por las Normas Internacionales de Calidad de Agua Potable (Normas de los Estados Unidos de América, Comunidad Económica Europea y Organización Mundial de la Salud) (ver tabla 9.11).

Para cada uno de los análisis realizados se establecieron las siguientes comparaciones entre el agua cruda y el agua obtenida del proceso investigado:

1- pH

Después del tratamiento el pH sufrió un incremento de 6.7 a 7.0, debido posiblemente a la liberación del ácido sulfhídrico contenido en el agua cruda, el cual al ser oxidado en el proceso de aireación resta componentes ácidos al agua. Además el Fe y Mn presentes como bicarbonatos pueden transformarse completamente a CO_2 , que al ser eliminado durante la aireación, produce también un efecto alcalinizante sobre el agua. Sin embargo, debido a la compleja naturaleza de las posibles reacciones ocurridas, se vuelve difícil dar una explicación más completa del aumento en el valor del pH.

La literatura reporta que este rango de pH favorece la remoción únicamente de los iones ferrosos no así la de los manganosos, sin embargo a las condiciones de pH neutro a las cuales se trabajó, ocurrió la oxidación de ambos metales, por lo que se considera que el efecto del pH no fue relevante en el experimento

y que su variación tampoco fue significativa. El pH final se encuentra dentro de los límites internacionales permisibles para agua potable.

2- Color y Turbidez

Son dos características interrelacionadas, ambas fueron eliminadas durante el tratamiento con lo que se cumple lo estipulado por las Normas Internacionales para agua potable. La apariencia amarillenta del agua cruda sugiere que el hierro y el manganeso son los responsables tanto del color como de la turbidez iniciales.

3- Alcalinidad

La alcalinidad determinada en el agua cruda y tratada es únicamente debida a los bicarbonatos, por lo que posiblemente ésta sea la forma en que el Fe y Mn están presentes en el agua.

Durante el tratamiento ocurre una disminución del 4% en la alcalinidad desde 135 a 130 ppm de CaCO_3 . Según lo observado puede decirse que toda la alcalinidad se transformó en dióxido de carbono o se precipitó como carbonato de calcio (CaCO_3).

4- Dureza

De los resultados obtenidos se concluye que existe tanto dureza temporal como no temporal en el agua cru

da. La primera es mayor que la segunda.

Durante el tratamiento ocurrió una disminución del 14% desde 140 a 120 ppm de CaCO_3 , lo que indica que la dureza posiblemente precipitó como carbonato o sulfato de calcio. El valor en el agua tratada se encuentra dentro de las normas internacionales, sin embargo para algunos fines industriales es necesario eliminarla, por su alto poder incrustante en sistemas de alta transferencia de calor.

5- Sólidos Totales

Durante el tratamiento ocurrió una disminución del 40% en el contenido de los sólidos totales, desde 250 a 150 ppm, lo que es un índice de la remoción de hierro, manganeso y del resto de componentes presentes en el agua cruda. El sistema mantiene dentro de normas este parámetro.

6- Sulfatos

Los sulfatos sufrieron una disminución del 20% durante el tratamiento, desde 70 a 56 ppm. Esto sucedió a pesar de la oxidación del ácido sulfhídrico, por lo que esto posiblemente esté relacionado con la disminución de la dureza y la consecuente precipitación de sulfato de calcio que pudo haber sido retenido por el filtro.

7- Cloruros

Los cloruros se incrementan en un 57% después del tratamiento debido a la adición de hipoclorito de calcio al 65% (utilizado para desinfección del agua). Sin embargo el agua obtenida cumple con las normas de calidad internacionales.

8- Materia Orgánica

La materia orgánica es posiblemente la responsable de la existencia de especies de hierro acomplejadas, ya que las concentraciones relativamente bajas de la primera corresponden en cantidad a las de las segundas, tanto al inicio como al final del tratamiento.

El tratamiento ha reducido en un 22% el contenido de materia orgánica inicial, lo cual está posiblemente relacionado con la remoción de otros compuestos afines a ella (Fe quelatado, turbidez, color, reducción de la actividad bacteriana, etc.). Sin embargo, mediante el análisis realizado solamente ha sido posible cuantificarla, no se ha podido determinar su naturaleza química.

9- Acido Sulfhídrico y Olor

Su presencia en el agua cruda resultó evidente por el olor característico, del cual estaba exenta el agua tratada, a pesar de que el análisis químico determinó

que al final del tratamiento sí existía H_2S en una concentración de 1.49 ppm.

Esto puede tener diferentes explicaciones:

- Posiblemente concentraciones muy bajas de H_2S no son perceptibles por el olfato.
- Por el contrario, aunque aparentemente los análisis indican que el compuesto fue removido únicamente en un 40%, hay que considerar también que puede existir error en la cuantificación, debido a que el método utilizado no es muy específico ya que el yoduro es capaz de reaccionar con cualquier otra sustancia reductora presente en el agua.
- Cabe también la posibilidad que el H_2S en el agua tratada provenga de la lava, la cual en determinado momento por algún tipo de reacción esté cediendo compuestos azufrados que lo generan.
- También hay que considerar que la existencia de crecimientos bacteriológicos pueden haber mantenido estas pequeñas concentraciones en el agua de salida del filtro.

10- Hierro

El hierro en todas sus formas (total, soluble y complejo) es removido con una alta eficiencia por los procesos empleados. La disminución del Fe quelatado es importante ya que existen algunos filtros comercia

les utilizados actualmente que no lo eliminan a diferencia de este sistema.

Se estima que la adición de cloro pudo también favorecer la remoción de los complejos de hierro.

11- Manganeso

Al igual que el hierro este metal fue removido eficientemente, lo cual indica que posiblemente sobre medio filtrante se llevó a cabo la reacción autocatalítica y la del efecto de compuestos férricos previamente precipitado, aunado al efecto oxidativo de la cloración.

12- Bacterias

En general la actividad bacteriana ha sido reducida notablemente. En el caso de bacterias coliformes totales y coliformes fecales la eliminación es total, mientras que las bacterias mesófilas aeróbicas se han reducido en un 72%. Esta se debe a la adición de hipoclorito de calcio al agua en tratamiento, pues se llegaron a obtener valores de cloro residual de 0.5 ppm, el cual es bastante alto en relación al valor recomendado por las normas internacionales de agua potable (0.1 ppm) (51).

La presencia de bacterias mesófilas aeróbicas en el agua tratada puede deberse a las siguientes causas:

- La lava volcánica por ser un material que se encuentra en el suelo y poseer muchos intersticios, es capaz de alojar en ellos esporas resistentes tanto a agentes físicos (tratamiento térmico) como químicos (cloración), las cuales posteriormente se activan cuando son colocadas en el medio de cultivo donde germinan y forman colonias.
- Durante las pruebas de determinación de estos microorganismos puede haber ocurrido una contaminación previa (cajas petri o medio de cultivo) o durante la siembra e incubación, debido a que no se cuenta con las condiciones adecuadas para el desarrollo de experimentaciones microbiológicas.

11.5 CAPACIDAD DE RETENCION DE LA LAVA

Debido a las condiciones de laboratorio y al comportamiento desconocido de la piedra volcánica de retener Fe y Mn precipitado, no fue posible determinar, en diferentes pruebas de laboratorio realizadas, la concentración máxima de estos elementos que retiene la piedra volcánica antes de agotarse; razón por la cual únicamente se calculó la cantidad de Fe y Mn que se removió por volumen de lecho filtrante durante la experimentación realizada, obteniéndose capacidades de retención de ésta (mg de Fe o Mn removido/pie³ de lava volcánica) superiores a las capacidades

máximas reportadas para los filtros comerciales Greensand y Birm.

En la tabla 11.3, se presentan las capacidades de retención obtenidas para la lava volcánica y las capacidades máximas reportadas para los filtros comerciales Greensand y Birm.

TABLA 11.3
CAPACIDADES DE RETENCION DE DIFERENTES MEDIOS FILTRANTES

MEDIO FILTRANTE	ALTURA DEL LECHO FILTRANTE (m)	CAPACIDAD DE RETENCION	
		Fe (mg /pie ³)	Mn (mg /pie ³)
Lava volcánica	0.4-0.8	152,424.0	79,999.34
Greensand (28)	---	40,000.0	20,000.00
Birm (66)		25932.5 -32404.4	---

Como puede observarse en la tabla 11.3, las capacidades de retención de Fe y Mn de la piedra volcánica sin agotarse son valores bastante elevados comparados con las capacidades de los lechos comerciales Greensand y Birm, por lo que se considera, que estos resultados permiten asumir que la capacidad de retención máxima de la piedra volcánica es superior a la de los lechos

filtrantes comerciales, lo cual representa una alternativa económica a los severos problemas originados por la presencia de Fe y Mn en las aguas subterráneas para uso doméstico e industrial, debido a que la piedra volcánica es un recurso natural de suma abundancia en este país, que solamente requiere un tratamiento de preparación que básicamente consiste en la reducción de tamaño y esterilización con calor, y que tiene un costo de $\$250.65/\text{pie}^3$ de lava volcánica, que comparado con el costo de la resina de Greensand de $\$975/\text{pie}^3$ de Greensand, resulta sumamente económico.

Además en pruebas de laboratorio realizadas se demostró que la lava volcánica no requiere el uso de productos químicos para su regeneración y limpieza, necesitando únicamente lavados suficientes de agua.

11.6 REGENERACION DEL LECHO FILTRANTE

Para llevar a cabo la remoción de hierro y manganeso es imprescindible que el lecho filtrante esté recubierto con una capa de óxidos de ambos metales, al efectuar los lavados de la piedra volcánica con los cuatro diferentes soluciones utilizadas (agua, ácido clorhídrico, hidrosulfito de sodio y una combinación de los tres solventes), son los lavados con agua y con hidrosulfito de sodio los que permiten que permanezca una pequeña capa de óxido en la su

perficie de las piedras.

Entre estos dos el más recomendable es el lavado con agua por su bajo costo.

11.7 EVALUACION ESTADISTICA

11.7.1 Repetibilidad de los Resultados

A. Proceso de Aireación

i) Remoción de Hierro

En general, los porcentajes de coeficiente de variación obtenidos en el proceso de aireación (ver tabla 9) muestran que los resultados obtenidos tienen buena repetibilidad, y aunque las corridas 3, 8, 9 y 12 tienen un alto porcentaje de coeficiente de variación (8.62, 8.34, 17.18, 21.12%, respectivamente) sus resultados han sido aceptados, ya que se considera que es difícil realizar un control exacto del sistema construido, tanto en la operación de éste como en la calidad del agua que lo alimenta.

Algunos factores que provocan el control inexacto del sistema construido son: variaciones en el flujo de corriente eléctrica (provoca cambios en el flujo de aire y agua, difíciles de controlar manualmente por medio de válvulas), variaciones de la concentración de hierro y manganeso del agua cruda utilizada, análisis químicos, etc.

ii) Remoción de Manganeso

En la remoción de manganeso (ver tabla 9) ocho de las corridas tienen coeficiente de variación igual a cero lo que indica que las dos repeticiones llevadas a cabo en cada una de estas muestran resultados iguales, aunque existe la posibilidad de que la baja sensibilidad del método de análisis de manganeso no esté mostrando las diferencias existentes entre ambas repeticiones, lo cual no significa que los resultados obtenidos no son en extremo muy exactos. Las cuatro corridas restantes tienen un coeficiente de variación diferente de cero (7.71, 7.46, 4.42, 10.9), los cuales son aceptados debido a que su variación es consecuencia de la experimentación, la diferencia entre las repeticiones la provocan los factores difíciles de controlar en el sistema construído.

B. Proceso de Filtración

i) Remoción de Hierro

En todas las corridas la repetibilidad es bastante buena, el mayor valor de coeficiente de variación es de 2.04%, esta mejoría de la repetibilidad, en comparación con la aireación puede deberse probablemente a que el filtro es un sistema cerrado donde hay un mayor control de oxidación de ambos metales, además de la experiencia ganada ya por el experimentador, que le permitía tener un mejor control sobre el sistema.

ii) Remoción de Manganeso

La repetibilidad de estos resultados es aún mejor que para la remoción de hierro, en nueve corridas el coeficiente de variación es igual a cero, los valores de las tres corridas restantes son: 0.08, 0.25 y 0.77, los cuales son muy pequeños, de nuevo se explica que la sensibilidad del método de análisis de manganeso es pequeña, por lo que no son evidentes las diferencias entre los resultados, más que todo al final del proceso de filtración ya que aquí las concentraciones de manganeso son bajísimas y el método no puede detectar concentraciones menores de 0.01 ppm de manganeso, dando como respuesta, cero o no detectable, lo cual ha ocurrido en la mayoría de los casos. Por las razones anteriores se afirma que los resultados obtenidos son reales pero no en extremo exactos.

11.7.2 Regresión

A. Establecimiento de la Regresión entre las Variables Independientes y las Variables Respuesta

Para el proceso de aireación se establece un modelo matemático en base a la remoción de hierro (ecuación 9.1), esta regresión es del tipo polinómico múltiple de grado uno, con cuatro variables independientes simples, cinco interacciones dobles y una interacción triple. Con respecto al proceso de filtración, se obtuvieron dos modelos matemáticos en base a la remoción de hierro y manganeso, respec

tivamente, el primero (ecuación 9.2) es también de tipo polinómico múltiple de grado uno, con una variable independiente simple, tres interacciones dobles y una interacción triple. La segunda es de tipo polinómico múltiple de grado dos, con dos variables simples al cuadrado y una interacción doble al cuadrado. Las tres regresiones seleccionadas son las que mejor predicen el comportamiento del aireador y del filtro, ya que pasan todas las evaluaciones estadísticas utilizadas.

11.8 EVALUACION ECONOMICA

Debido a que no fue posible determinar el volumen de agua que el sistema produce antes de agotarse el filtro; en la evaluación económica únicamente se determinó el costo del sistema construido y los costos de energía eléctrica y producto químico (hipoclorito de calcio al 65%) consumidos durante la experimentación, para la producción de un metro cúbico de agua, obteniéndose que el costo del sistema construido es de $\$8,110.10$ y que puede ser reducido si el sistema es construido por personas expertas, tanto en la manipulación del PVC como en el trabajo de plomería.

Con respecto a los costos de producción, el costo de energía eléctrica consumida en el sistema, durante la experimentación para la producción de un metro cúbico de agua,

fue de \$4.82. Se considera que este costo es elevado debido a las condiciones del equipo utilizado (mayor capacidad de la requerida, equipo usado el cual ha sido modificado para los fines de la experimentación), y a que el sistema construido opera en forma discontinua demandando un mayor gasto de energía.

El costo de reactivo químico (hipoclorito de calcio al 65%) utilizado por metro cúbico de agua producida fue de \$0.49. Es importante mencionar que la cantidad de hipoclorito de calcio adicionado por corrida (1 g) produjo una concentración de cloro residual entre 0.5 y 1 ppm, concentración alta comparada con las recomendadas por las normas de calidad (0.1 ppm de cloro residual); por lo que se considera que el costo de este producto químico puede ser reducido si se adiciona una cantidad de hipoclorito de calcio que produzca una concentración de cloro residual de 0.1 ppm.

En general, se considera que los costos de producción son elevados, principalmente la energía eléctrica, debido a que han sido obtenidos mediante el funcionamiento de una planta semi-piloto, que operó para los objetivos de la experimentación, en forma discontinua. Los costos de producción podrían reducirse por ejemplo: utilizando filtros en paralelo e inyectores de aire que no consumen energía eléctrica, y diseñando el sistema para operar en forma continua.

XII. MANUAL DE OPERACION

Con el objetivo de proporcionar una guía para la operación del sistema construido, el manual de operación que se presenta describe los pasos del proceso de filtración a las mejores condiciones de trabajo obtenidas experimentalmente (ver tabla 9.7).

En el proceso de filtración se encuentra incluida la etapa de aireación, también a las condiciones óptimas de operación (ver tabla 9:2).

La vista esquemática del sistema construido (plano 3/3), se presenta como complemento del manual de operación, para proporcionar una mejor visualización del sistema y de las partes de éste que más influyen en su operación, así como de las diferentes trayectorias que toma el agua, según los requerimientos del proceso (funcionamiento, retrolavado y deaireación).

El procedimiento para la operación del sistema se detalla a continuación:

1. Cebiar la Bomba
2. Deairear el Filtro
 - a) Quitar el tapón desaireador

- b) Abrir la válvula de compuerta 3 y las válvulas de bola 4 y 8.
- c) Alimentar el filtro por el fondo del recipiente; se efectúa poniendo en funcionamiento la bomba 1.
- d) En el momento que el agua comience a salir por el orificio desaireador, cerrarlo y apagar la bomba.

La trayectoria que sigue el agua en el proceso de desaireación, es la misma del retrolavado y se muestra por flechas oscuras en la vista esquemática del sistema que se presenta en el plano 3/3.

3. Efectuar Proceso de Aireación

Pasos:

- a) Introducir 20 galones de agua cruda, al tanque aireador.
- b) Proporcionar una abertura de 2 vueltas a la válvula de aguja.
- c) Proporcionar un tiempo de aireación de 30 min , al agua cruda; se realiza poniendo en funcionamiento el compresor durante este período de tiempo.
- d) Después de los 30 minutos, apagar el compresor y proporcionar al sistema de aireación un tiempo de reacción y sedimentación (tiempo de reposo) de 15 min.
- e) Al final de los 15 min. adicionar 1 gramo de hipoclorito de calcio al 65%.

- f) Para asegurar la desinfección del agua por efecto del cloro, proporcionar un tiempo de contacto y agitación. Se realiza poniendo en funcionamiento el compresor durante 20 minutos.
- g) Determinar la concentración de cloro residual libre presente, después de los 20 minutos de contacto y agitación.

La muestra de agua, para el análisis, se toma por la válvula de chorro ubicada a la salida del aireador.

4. Efectuar Proceso de Filtración

Pasos:

- a) Abrir completamente las válvulas de compuerta 2, 5 y 9, y las válvulas de bola 6 y 7.
- b) Poner en funcionamiento la bomba 1, para alimentar el filtro con el agua contenida en el aireador.
- c) Una vez entre en funcionamiento la bomba 1, encender la bomba 2, para mantener constante el nivel de agua en el tanque aireador.
- d) Al iniciar la salida del agua por el filtro coleccionar 0.03011 m^3 de agua (agua utilizada para la aireación del filtro) en un recipiente de esta capacidad y eliminarla.
- e) Una vez eliminado este volumen de agua, coleccionar en un tanque reservorio 0.0757 m^3 de agua (volumen de

agua tratada por corrida); y al completar este volumen, apagar las bombas 1 y 2.

La trayectoria que sigue el agua en el proceso de filtración, se muestra por flechas claras : en la vista esquemática del sistema (Plano 3/3).

Proceso de Limpieza

Pasos:

- a) Abrir completamente las válvulas de compuerta 3, 5 y 9 y, las válvulas de bola 6 y 7.
- b) Poner en funcionamiento la bomba 1 durante 10 minutos.

La trayectoria que sigue el agua en el proceso de limpieza es la misma que sigue en el proceso de filtración, solo que en este caso el filtro es alimentado con el agua colectada en el tanque reservorio.

El agua utilizada para la limpieza del filtro se descarga hacia las tuberías de aguas negras.

Proceso de Retrolavado

Pasos:

- a) Abrir completamente la válvula de compuerta 3, las válvulas de bola 4 y 8 y la válvula de chorro 10.

- b) Poner en funcionamiento la bomba 1 durante 10 minutos.

El agua de retrolavado se descarga por la válvula 10 y se conduce hacia las tuberías de aguas negras.

La trayectoria del agua en el proceso de retrolavado se muestra en el plano 3/3.

XIII. UTILIZACION DE LOS DESECHOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE REMOCION DE HIERRO Y MANGANESO

13.1 POSIBLES USOS INDUSTRIALES DE LOS OXIDOS PRESENTES EN LAS AGUAS DE LAVADO Y RETROLAVADO

Cuando en una planta de tratamiento de aguas destinada a la remoción de hierro y manganeso es necesario lavar o retrolavar el medio filtrante, se desprende de éste una gran cantidad de óxido que se va en las aguas de lavado, el destino de estos últimos es algún río de aguas negras que durante su trayecto deja estos óxidos en los suelos y por medio del agua lluvia vuelven a redisolverse creando un problema de recontaminación de los mantos acuíferos; como alternativa para la solución de este problema se presentan algunos usos de estos desechos; sin embargo es recomendable hacer un análisis económico de esta alternativa ya que para poder utilizarlos es necesario separarlos de la mezcla en que se encuentran y purificarlos, lo cual implica costos.

13.1.1 Usos del Oxido de Hierro

Una de las principales materias primas para obtener pigmentos inorgánicos amarillos, anaranjados, rojos, castaños, pardos y negro, son los óxidos de hierro, tienen mayor

importancia comercial ya que existen en la naturaleza en grandes cantidades.

Dependiendo del pigmento deseado, los óxidos pueden sufrir o no un tratamiento, el óxido férrico hidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) es de color amarillo, al calcinarlo se obtiene Fe_2O_3 que es de color rojo. Los óxidos de hierro que han sido preparados por calcinación tienen tonos que varían entre rojo claro y rojo oscuro azulado.

El óxido negro de hierro (Fe_3O_4) debe de oxidarse para convertirse en óxido férrico rojo.

Las propiedades más notables de los óxidos son su bajo costo, su permanencia contra el desvanecimiento y su buena capacidad de cubrimiento.

El rojo, el negro y el amarillo se usan en pinturas emulsionadas, en alimentos, en cosméticos y medicinas.

El negro tiene gran capacidad de cubrimiento y excelente potencia colorante, tiene partículas finas de tamaño uniforme, se moja fácilmente y se dispersa bien en casi todos los vehículos para pinturas, se usa en imprimaciones y en revestimiento de acabados para hacer estructuras, acabados para la conservación de ferrocarriles, equipo de acero, tinturas, cemento, pinturas de emulsión y de agua.

El óxido férrico (hidratado o seco) se usa mucho como pigmento para el caucho, las pinturas, el papel, el linóleo y la cerámica. La pintura de óxido rojo se usa mucho en los cascos de los buques y otras construcciones de hierro. En cerámica se emplea en vidriados rojos, anaranjados, verdes, amarillos, azules y violetas, son oscuros y carecen de brillo.

Muchos abrasivos que se emplean para pulir o refinar son óxidos metálicos, el Fe_2O_3 se usa para pulir cristal de lunas, materiales plásticos y metales (sobre todo los más valiosos). Son pulimentos en polvo y se clasifican como abrasivos blandos.

El óxido de hierro se puede utilizar como oxidante, en cualquier proceso en que sea requerido un agente de este tipo, a excepción de las reacciones en las que el hierro sea una impureza indeseable (64).

13.1.2 Usos del Oxido de Manganeso.

El dióxido de manganeso se usa como cátodo en las pilas eléctricas mezclado con carbón. Los minerales para pilas se caracterizan por su textura terrosa y porosa, o sea, que muestran una estructura cristalina defectuosa.

En las industrias metálicas se usa en la producción de aleaciones de manganeso y para producir manganeso metálico por el procedimiento electrolítico. Los usos químicos

son principalmente la fabricación de sulfato manganoso fertilizante, como oxidante y como materia prima para los permanganatos. En la industria vidriera se utiliza para neutralizar el color verdoso que comunica el hierro al vidrio (descolorante), como secante en la industria de barnices, pinturas, etc., como vidriado de color pardo en la industria cerámica y como material para ánodos inatacables en ciertos procesos electrolíticos en gran escala (64).

CONCLUSIONES

1. Las aguas de las muestras analizadas en los diferentes lugares pueden considerarse como ricas en compuestos ferrosos y manganosos, con cierta cantidad de materia orgánica, especies quelatadas de hierro, ácido sulfhídrico, valores de pH neutros y generalmente contaminadas con bacterias coliformes; es decir que no son aptas para consumo humano, por lo que se vuelve necesario hacer tratamientos correctivos a la calidad del agua.
2. El hierro y manganeso de las aguas subterráneas en concentraciones que causan problemas para el uso doméstico e industrial de éstas, pueden ser removidos por retención en un lecho de lava volcánica, siempre y cuando se le proporcione un pretratamiento de oxidación con oxígeno y cloro adecuado al agua subterránea, y el lecho filtrante de lava volcánica haya sido previamente cargado con óxidos e hidróxidos férricos y mangánicos para el desarrollo de la autocatálisis.
3. El pH de las aguas subterráneas utilizadas en esta investigación (6.5-7.5), favoreció el proceso de aireación por difusión del sistema construido, en la oxidación del hierro soluble; obteniéndose una oxidación casi completa de este elemento, mientras que el mangane-

- so soluble fue oxidado parcialmente en cantidades apreciables.
4. El hipoclorito de calcio al 65% utilizado en esta experimentación, es un producto químico, que además de potabilizar el agua, oxida cantidades apreciables de hierro y manganeso solubles no afectados por el proceso de aireación, asegurando de esta forma una mejor eficiencia en el proceso de filtración.
 5. La capacidad máxima de retención de hierro y manganeso de la piedra volcánica, es superior a la de los medios filtrantes comerciales: Greensand y Birm.
 6. La piedra volcánica negra, utilizada como medio filtrante, posee capacidades de retención de hierro y manganeso que permitió obtener, en esta investigación, agua dentro de los límites aceptables por las normas de calidad en lo referente a estos elementos, requiriendo únicamente como pasos previos a la reducción de tamaño, esterilización y formación de una capa de óxidos e hidróxidos férricos y mangánicos, lo cual implica una inversión que es considerablemente menor al costo de los lechos filtrantes importados utilizados para remover el hierro y manganeso.
 7. Aunque en esta investigación se han obtenido buenos porcentajes de remoción de hierro y manganeso a diferentes condiciones de trabajo del sistema construido, los más altos porcentajes de rendimiento en la remo-

ción de estos elementos fueron logrados a condiciones específicas, por lo que se concluye que las condiciones óptimas para la operación de los procesos unitarios (aireación por difusión y filtración oxidativa a presión) del sistema construido son:

a) En el aireador:

Tiempo de aireación	30 min
Diámetro de orificio	4.2 mm
Altura de agua	48.67 cm
Tiempo de reacción y sedimentación	15 min

b) En el filtro:

Tamaño de partícula	0.6 mm
Altura de lecho filtrante	80 cm
Flujo de agua	14 gal/min
Cloración	1 g $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ /corrida

8. El uso de la piedra volcánica como medio filtrante, representa una alternativa técnico-económico de los sistemas de tratamiento de agua empleados para la remoción de hierro y manganeso, ya que la lava volcánica posee capacidades de retención de estos elementos, superiores a la del Greensand (medio filtrante comercial utilizado para la remoción de Fe y Mn), con un costo 3.89 veces menor que el de este medio filtrante.
9. Se encontró que el agua es el mejor regenerante del

lecho filtrante de lava volcánica que se utilizó para la remoción de hierro y manganeso, por su bajo costo, disponibilidad inmediata y porque permite dejar cierta cantidad de óxidos e hidróxidos férricos y mangánicos sobre las partículas de lava para que el efecto autocatalítico proceda.

10. El sistema construído para eliminar el hierro y manganeso de las aguas subterráneas es eficiente, ya que además de remover estos elementos a concentraciones abajo de los límites más rigurosos establecidos por las normas de calidad, elimina muchos componentes indeseables en el agua para consumo humano. Todos los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos se encuentran abajo de los valores máximos permisibles por las normas internacionales, lo que indica que el agua obtenida es de excelente calidad y que con él se pueden tratar eficientemente aguas con diferentes contenidos de hierro y manganeso.

RECOMENDACIONES

1. El sistema construído para eliminar el hierro y el manganeso de las aguas subterráneas utilizadas en la etapa experimental de este trabajo, se diseñó para operar en forma discontinua, durante los procesos de aireación y cloración. Dicho sistema satisface los objetivos de esta investigación; sin embargo, su forma de operar no es la más adecuada para plantas de tratamiento de aguas cuyo principal objetivo es producir la mayor cantidad de agua potable en el menor tiempo de operación y al más bajo costo, por tal razón se recomienda que en posteriores investigaciones se examinen otros tipos de aireadores y cloradores que permitan una operación continua del sistema de tratamiento de aguas evaluado.
2. Aunque el sistema de tratamiento investigado es capaz de remover eficientemente los compuestos ferrosos y manganosos, su efecto sobre otros elementos presentes en el agua no ha sido estudiado más que parcialmente, por lo que es recomendable investigar la naturaleza de los materiales depositados y retenidos sobre la lava volcánica, a fin de evaluar la capacidad de restaurar su utilidad como medio filtrante.

3. Durante la investigación para seleccionar y evaluar el agua de trabajo se tomaron en cuenta muchos parámetros que permitieron evaluar la efectividad del sistema. Estos incluyeron Fe, Mn y bacteriológicos como primarios y pH, ácido sulfhídrico, alcalinidad y materia orgánica como secundarios. Sin embargo, no fue posible analizar otros que son también muy importantes como la sílice, por su alto poder incrustante, pues el equipo además de eliminar Fe y Mn debe tener la característica de ser económico y prácticamente recuperable de incrustaciones. Por lo que es recomendable incluir dentro de los análisis químicos la determinación de éste y otros elementos, pues es indudable que para muchos usos el agua obtenida debe someterse a otros tratamientos correctivos para poder adecuarla a las diferentes necesidades.
4. Todo tratamiento utilizado para acondicionar el agua está íntimamente relacionado con la determinación de los diferentes componentes del agua en cuestión, pues ésta es la única forma directa mediante la cual se pueden conocer cuáles características deben corregirse de acuerdo con el uso a que esté destinada la fuente y la medida en que éstas están siendo afectadas por el sistema empleado. Por lo que se recomienda realizar análisis completos al inicio, fases intermedias y al final de cualquier tratamiento para estable

cer su eficiencia.

5. Durante la realización del presente estudio los métodos de análisis utilizados estuvieron limitados por la disponibilidad tanto de reactivos como de equipo, por lo que algunos de ellos carecen de elevada sensibilidad, volviéndose poco veraces cuando las concentraciones presentes en las muestras de agua son muy bajas. El método utilizado en las determinaciones de hierro es bastante sensible no así el de manganeso, pues al final del tratamiento sus concentraciones eran tan pequeñas que el método no fue capaz de determinarlas exactamente. Por esta razón se recomienda que en próximas investigaciones se utilicen métodos de análisis más sofisticados como la absorción atómica con horno de grafito.
6. Puesto que la capacidad total del sistema para la remoción de Fe y Mn no fue determinada exactamente, se debe en principio investigar la cantidad de estos elementos y el tiempo necesario para lograr el agotamiento del filtro, en el caso que se deseara comercializar el sistema.
7. La asepsia del medio filtrante fue llevada a cabo a través de tratamiento térmico, lo cual por conllevar una serie de gastos de energía y disponibilidad de un equipo apropiado representa muchos inconvenientes si el proceso se implantara a una escala industrial, por

- lo que se recomienda ensayar otro tipo de esterilización como la utilización de un lavado con cloro, que reduciría ampliamente los gastos y las dificultades que implica el procedimiento mencionado inicialmente.
8. Por posibles errores de diseño, se recomienda no utilizar las regresiones seleccionadas en esta investigación en extrapolaciones, solamente deberán ser empleadas en los rangos de niveles establecidos y para plantas que se diseñen respetando las mismas especificaciones de construcción, cuando se desea un escalamiento.
 9. Para obtener datos reales de inversión fija de capital y costos de producción de un sistema de tratamiento de agua que utilice lava volcánica como lecho filtrante para la remoción de hierro y manganeso, se sugiere construir una planta a escala comercial bajo las recomendaciones de este estudio, en la cual el lecho filtrante de lava volcánica haya sido agotado.
 10. La conservación y explotación racional de los recursos naturales involucra el control o eliminación de los residuos provenientes de las plantas de tratamiento. En el acondicionamiento del agua a través del sistema estudiado, se genera una gran cantidad de sedimentos y depósitos de óxidos y otros materiales que resultan contaminantes si retornan a los afluentes sin ningún tipo de tratamiento, por lo que se reco-

mienda, como una alternativa a este problema, una investigación más profunda sobre la composición de estos lodos y su uso potencial.

REFERENCIAS

1. Camp Thomas, R. y R. Meserve, "Water and its impurities", Segunda edición, Hutchinson and Ross Inc., Pennsylvania, U.S.A., (1974).
2. Jenkins, D. y V. Snoeyink, "Química del agua", Primera edición, Editorial Limusa S.A. de C.V., México, (1987).
3. López Bernal, G.O., "Estudio de la incidencia de la sílice en la alcalinidad y bufferización de aguas en algunas zonas industriales de El Salvador", Trabajo de graduación previa opción al título de Ingeniero Químico, Universidad Politécnica de El Salvador, San Salvador, (1984).
4. Olmedo García, J.C., "Curso sobre hidrología y evaluación de los recursos de aguas subterráneas. La calidad del agua y explotación de acuíferos", Comité Nacional de Instituciones de Agua Potable (CONIAPOS), San Salvador, (1983).
5. Organización Panamericana de la Salud (OPS), "Producción y comercialización de sustancias químicas y otros insumos de uso común en sistemas de agua potable y saneamiento", Proyecto subregional del capre, San Salvador, (1990).
6. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Organización Mundial de la Salud (OMS), "Supervisión de plantas de tratamiento de agua", Manual DTIAPA No.E-2, Programa de protección de salud ambiental, Perú, (1985).

7. Organización Mundial de la Salud (OMS), Organización Panamericana de la Salud (OPS), "Red de monitoreo para la calidad del agua suministrada por ANDA", Proyecto de agua potable y saneamiento a poblaciones afectadas, San Salvador, (1990).
8. Olmedo García, J.C. e I.F. Mendoza, "Control operacional y mantenimiento de plantas potabilizadoras", Manual preparado para la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), San Salvador, (1990).
9. American Water Work Association (AWWA), "Principles and practices of water supply operations", Introduction to water quality analysis, New York, (1985).
10. Parras, M.J., "Aguas subterráneas. Problemas generales de contaminación", Cuadernos del CIFCA, Madrid, (1978).
11. Organización Mundial de la Salud (OMS), "Informe relativo a la consultoría en potabilización de aguas prestada a ANDA", Proyecto suministro de agua potable y saneamiento a poblaciones afectadas, San Salvador, (1985).
12. Consultoría e Investigación para el Desarrollo Empresarial, Memoria, Seminario "Tratamiento de aguas industriales", San Salvador, (1985).
13. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), Seminario "Tratamiento de aguas para calderas y ahorro de energía en sistemas de vapor", Proyecto de eficiencia energética en la industria regional, Guatemala, (1989).

14. Peter, R.H., "Textile Chemistry", Primera reimpresión, Editorial Reverté S.A., Londres, (1963).
15. Barnes, D. y P. Wilson, "Chemistry and unit operations in water treatment", Primera edición, Applied Sciences Publishers, New York, (1983).
16. Morales Sandoval, P.A., "Evaluación del problema de la remoción de Fe y Mn en las aguas naturales", Trabajo previo a la incorporación a Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, San Salvador, (1985).
17. Fair, G.M., I.C. Geyer y D.A. Okun, "Purificación de aguas, tratamiento y remoción de aguas residuales", Tomo II, Primera edición, Editorial Limusa S.A., México, (1979).
18. Levenspiel, O., "Ingeniería de las reacciones químicas", Edición en español, Editorial Reverté S.A., Barcelona, (1987).
19. Foust, C., "Iron removal limits", Water Technology, U.S.A., Abril, (1991).
20. Guzmán, A., "Ingeniería sanitaria, agua", Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Ingenieros, México, (1987).
21. Brack, T.D., D.W. Smith y M.T. Madigan, "Microbiología", Cuarta edición, Prentice Hall Hispanoamérica S.A., México, (1987).
22. Chacón, J.F., "Manual para la selección, operación, mantenimiento y evaluación económica de sistemas de cloración", Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, (1991).

23. Esselborn, C., "Tratado general de construcción", Obras Públicas, versión de la octava edición alemana, Tomo II, Barcelona, (1930).
24. American Water Work Association (AWWA), "Agua, su calidad y tratamiento", Centro regional de ayuda técnica, Agencia para el Desarrollo Internacional (AID), México, (1968).
25. Daris, R. y R.B. Façkler, "Removal of iron and manganese by ferrosand CR and IR", Hungerford and Terry Inc., New Jersey, (sin fecha de publicación).
26. Ordóñez, G.A., "Suministro de agua potable y saneamiento a poblaciones afectadas", Proyecto ELS/85/006/PNUD, publicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), San Salvador, (1987).
27. Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), "Análisis físico-químicos de aguas de pozo de diferentes zonas del país", El Salvador, (1991).
28. Segura Lemus, V.M., Lic., Catedrático de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador, entrevista personal, San Salvador, 1991.
29. Huevo de Oliva, E.B., "Manual de actividades microbiológicas", realizado para la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), Subsección de ingeniería geotérmica, Laboratorio químico, El Salvador, (1981).
30. American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA), "Standard methods for the examination of water and wastewater", Décimo cuarta edición, New York, (1975).

31. Deago, J.B., "Manual para operaciones de plantas de purificación", Ministerio de Salud Pública e Instituto Nacional de Fomento Municipal. Trabajo presentado al XII Congreso de Ingeniería Sanitaria, México, (1970).
32. Huevo de Oliva, E.B., Dra. e Ing., Catedrática de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador, entrevista personal, San Salvador, (1991).
33. American Water Work Association (AWWA), "Principles and practices of water supply operations", Introduction to water treatment operations, U.S.A., (1985).
34. Treybal, R.E., "Operaciones de transferencia de masa", Segunda edición, Editorial McGraw-Hill, México, (1980).
35. Weber, W.I., "Physicochemical, process for water quality control", Edited by Robert L. Metcalf, University of Illinois, U.S.A., (1971).
36. Welty, J.R., C.E. Week y R.E. Wilson, "Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa", Segunda edición, Editorial Limusa S.A. de C.V., México, (1991).
37. Webb, P.C., "Ingeniería bioquímica", Primera edición, Editorial Acribia, Zaragoza, México, (1966).
38. Organización Mundial de la Salud (OMS), "Filtración rápida", Manual DTIAPA No. E-2, Programa de Protección de Salud Ambiental, Lima, Perú, (1988).
39. Cox, R.C., "Práctica y vigilancia de las operaciones de tratamiento de agua", Organización Mundial de la Salud (OMS), Genova, (sin fecha de publicación).

40. Organización Mundial de la Salud (OMS), "Evaluación de plantas de tratamiento de aguas", Manual DTIAPA No.C-5, Programa de protección de salud ambiental, Tomo I, Perú, (1984).
41. Perry, R.H. y C.H. Chilton, "Manual del Ingeniero Químico", Quinta edición, Editorial McGraw-Hill, México, (1987).
42. Eckenfelder, J.V., "Water quality engineering for practicing engineers", Department of Environment and Water Resources Engineering. Vandervilt University, Printed by Barnes and Noble Inc., New York, (1973).
43. Andrew, S., "Choose a proper filter media", Water Technology, U.S.A., July, (1986).
44. Iraheta, G.N., Ing., Gerente de Aquatreat, entrevista personal, San Salvador, Noviembre, (1991).
45. Organización Mundial de la Salud (OMS), "Informe relativo a la consultoría de potabilización de agua prestada a la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) y al Plan Nacional de Saneamiento Básico Rural (PLANSABAR)", San Salvador, (1987).
46. McCabe, W.L. y J.C. Smith, "Operaciones básicas de Ingeniería Química", Tomo II, Primera edición en español, Editorial Reverté, S.A., Barcelona, (1973).
47. Cazares Martell, M.E., "Evaluación del uso de lava volcánica en la industria", Trabajo de graduación previo a la opción del título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, (1976).

48. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) y Centro Internacional para la Gestión de Desechos, "Filtración gruesa de flujo horizontal. Manual de diseño, construcción y operación", Perú, (1988).
49. Clausen III, C.A. y G. Mattson, "Fundamentos de química industrial", Primera edición, Editorial Limusa S.A., México, (1982).
50. Herrera Coello, R.A. y A.M. Rodríguez Álvarez, "Diseño de un dosificador de cloro adaptable en acueductos rurales", Trabajo de graduación previo a la opción de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, (1987).
51. Gómez, D., Br, Sub-Jefe de la Planta de Tratamiento de Agua de Guluchapa y Joya Grande de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), San Salvador, (1992).
52. Devore, J. and R. Peck, "Statistics, the exploration and analysis of data", 1st reprint, West Publishing Company, New York, (1986).
53. Little T. y F.J. Hills, "Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura", Primera edición en español, Editorial Trillas, México, (1976).
54. Davies, O.L., "Métodos estadísticos aplicados a la investigación y a la producción con especial referencia a la industria química", Traducción de la primera edición, selecciones gráficas, España, (1960).
55. Rico Peña, D. del C., Ing., Catedrática de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador, entrevista personal, San Salvador, (1991).

56. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, "Guía para la preparación, construcción y supervisión de abastecimiento de agua potable y saneamiento", Guatemala, (1991).
57. Marroquín, E.; Ing., Jefe de la Unidad Productiva de los Talleres de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, entrevista personal, San Salvador, (1992).
58. Molina de Trigueros, P., et.a., "Diseño de una planta para eliminar manganeso en sistemas de abastecimiento de agua para aguas rurales", Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador, San Salvador, Mayo, (1991).
59. Leal Mancía, R.A., "Estudio de la factibilidad económica de la implementación de una planta productora de yeso en la Universidad de El Salvador", Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador, San Salvador, (1991).
60. Cole Parmer Instrument Co., "Selected Equipment Instrument Supplies for Industrial Research, Health Sciences, Chemistry, Environmental Investigation and Pollution Control, Agriculture and Biology", Catalog 1991-1992, Chicago, Illinois, (1991).
61. Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), "Proyecto Planta Potabilizadora del Río Cuaya", San Salvador, (1980).

62. Campos Romero, A.O., "Elaboración de un cuaderno de cátedra para ser utilizado en la asignatura de Operaciones Unitarias I", trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, (1982).
63. Guevara, N.P., Ing., Subgerente de Operaciones de Servicios Técnicos de Ingeniería. Entrevista personal, San Salvador, Enero, (1992).
64. Kirk, R.E. y D.F. Othmer, "Enciclopedia de tecnología química", Primera edición en español, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, México, (1961).
65. Chapra, S.C. y R.P. Canale, "Métodos numéricos para ingenieros con aplicaciones en computadoras personales", Primera edición en español, Editorial McGraw-Hill, México, (1987).
66. Lucius Cole, P.E., "Non mechanical filtration systems", Water technology, U.S.A., Noviembre, (1990).
67. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), "Equipo y técnicas de medición para el ahorro de energía", Guatemala, (1985).

ANEXO A

DETERMINACIONES ANALITICAS
EN LAS MUESTRAS DE AGUA

A.1 DETERMINACION DE HIERRO

A.1.1 Reactivos

Los reactivos a utilizar son los mismos para las tres determinaciones de hierro. Todos los reactivos deben tener un bajo contenido de hierro, e igualmente se necesita agua destilada exenta de hierro. Para el almacenamiento se recomiendan frascos de tapón esmerilado; el ácido clorhídrico y la solución de acetato de amonio y las soluciones madre de hierro son estables indefinidamente, si se tapan herméticamente. Las de fenantrolina e hidroxilamina son estables por varios meses. Las soluciones de los patrones no son estables y deben usarse diluciones recientemente preparadas, por dilución de la solución madre.

- a) Ditionito de sodio para el análisis de Fe complejado.
- b) Acido clorhídrico concentrado.
- c) Reactivo de hidroxilamina

Se disuelven 10 g de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ en 100 ml de agua destilada.

d) Solución amortiguadora de acetato de amonio

Se disuelven 250 g de $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ en 150 ml de agua destilada. Se agregan 700 ml de ácido acético glacial y se diluye a 1 L.

e) Solución de fenantrolina

Se disuelven 0.1 g de 1, 10-fenantrolina monohidratada ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en 100 ml de agua destilada, con agitación y calentamiento a 80 grados centígrados, pero sin hervir. Se debe desechar la solución cuando se oscurezca. No es necesario el calentamiento si se agregan 2 gotas de HCl concentrado al agua destilada (1 ml de reactivo es suficiente para no más de 0.1 mg de Fe).

f) Solución madre de hierro

Se pesan 0.2 g de alambre de hierro y se pone en un matraz aforado de 1 L. Se disuelve en 20 ml de H_2SO_4 6N y se diluye con agua destilada exenta de hierro. Esta solución tiene 200 ppm de Fe.

g) Soluciones patrón de hierro

Deben prepararse el día que van a ser utilizadas. En este caso se partió de una solución madre de 200 ppm, de la cual se tomaron los diferentes volúmenes para cada uno de los patrones, diluyéndolos hasta el aforo en un volumétrico de 50 ml.

En la tabla A.1 se presentan los volúmenes de solución madre para los patrones respectivos.

TABLA A.1
VOLUMENES DE SOLUCION MADRE NECESARIO PARA
LA PREPARACION DE SOLUCIONES PATRON DE HIERRO

Patrón (ppm)	Vol. solución madre (ml)
1	0.25
2	0.50
3	0.75
4	1.00

A.1.2 Aparatos

Se utilizó un espectrofotómetro, para el caso el modelo Spectronic 20, para usarse en $510 \mu\text{m}$ con un trayecto de luz de 1 cm.

A.1.3 Procedimientos

a) Hierro Total

Se mezcla cuidadosamente la muestra y se miden 50 ml en un matraz Erlenmeyer de 125 ml. Se agregan 2 ml de HCl concentrado y 1 ml de reactivo de hidroxilamina. Se agregan unas cuantas perlas de vidrio y se calienta a ebullición. Para tener la seguridad de la disolución total del

hierro, se continúa la ebullición hasta que el volumen se haya reducido hasta 15-20 ml. Se enfría a la temperatura ambiente y se pasa a un matraz aforado de 50 ó 100 ml. Se agregan 10 ml de la solución amortiguadora de acetato y 2 ml de solución de fenantrolina y se diluye hasta el aforo con agua destilada. Se mezcla bien y se deja reposar cuando menos 10-15 minutos, para lograr el máximo desarrollo del color.

b) Hierro Soluble

El procedimiento es el mismo que para el hierro total, la diferencia radica en el pretratamiento que se le hace a la muestra, el cual se describe en la sección de muestreo.

c) Hierro Complejado

Se mezcla cuidadosamente la muestra y se miden 5 ml en un matraz Erlenmeyer de 125 ml. Se agregan 5 gotas de fenolftaleína. Se agrega 1 gota de amoníaco. Se agrega HCl 1+1, gota a gota hasta que la solución se vuelva incolora. Se añade 1 gota de HCl 1+1 en exceso. Se agregan 50 mg de ditionito de sodio, con agitación y se espera 4 minutos. Se agrega 0.5 ml de solución buffer. Se agrega 0.5 ml de solución de fenantrolina. Se mezcla bien, debe observarse el desarrollo del color.

Medición de Color:

Se prepara una serie de patrones, pipeteando con exactitud los volúmenes calculados de las soluciones patrón de hierro, en frascos volumétricos de 50 ml; y verificando los pasos que se indican en la sección de procedimiento. Para mediciones fotométricas, los patrones se deben leer ajustando a 100% de transmitancia (absorbancia cero), con agua destilada, trazando la curva de calibración, incluyendo un blanco.

Las lecturas fotométricas registradas se convierten a valores de hierro por medio de la curva de calibración. Este procedimiento no compensa por la presencia de iones interferentes (28).

Cálculos

El primer paso es la elaboración de la curva de calibración, para corroborar el cumplimiento de la Ley de Beer; posteriormente aplicar el principio de un punto para conocer la concentración de la muestra analizada, según la ecuación A.1

$$C_m = \frac{A_m \times C_p}{A_p} \quad (A.1)$$

Donde:

A_m = Absorbancia de la muestra

C_p = Concentración del patrón y

A_p = Absorbancia del patrón

En las tablas A.2 y A.3, se presentan los datos obtenidos para la elaboración de las curvas de calibración de hierro total-hierro soluble y hierro complejoado, representadas por las figuras A.1 y A.2

TABLA A.2
VALORES DE ABSORBANCIA PARA LOS PATRONES DE
HIERRO TOTAL Y HIERRO SOLUBLE

PATRON	Ap	CV (%)
1 ppm	0.223	1.62
2 ppm	0.391	0.95
3 ppm	0.61	2.31
4 ppm	0.701	1.01

Ap = Absorbancia-promedio de dos repeticiones.
CV(%) = Coeficiente de variación.

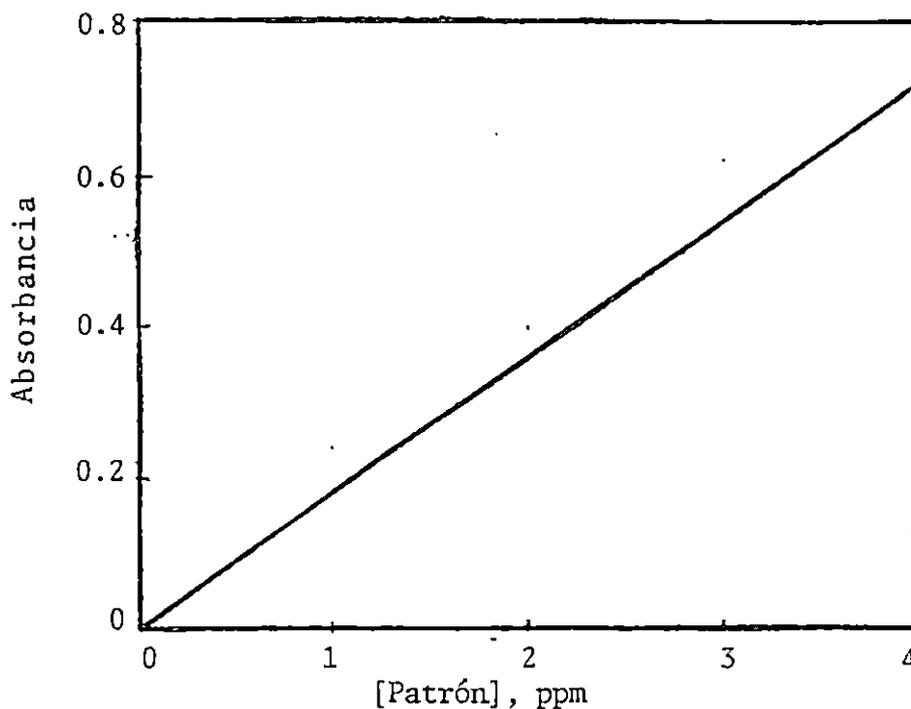


Fig. A.1 Curva de calibración para hierro total-hierro soluble

TABLA A.3
VALORES DE ABSORBANCIA PARA PATRONES DE HIERRO ACOMPLEJADO

PATRON	Ap	CV (%)
1 ppm	0.175	0
2 ppm	0.35	1.47
3 ppm	0.61	1.16
4 ppm	0.69	1.02

Ap = Absorbancia promedio de dos repeticiones
CV(%) = Coeficiente de variación

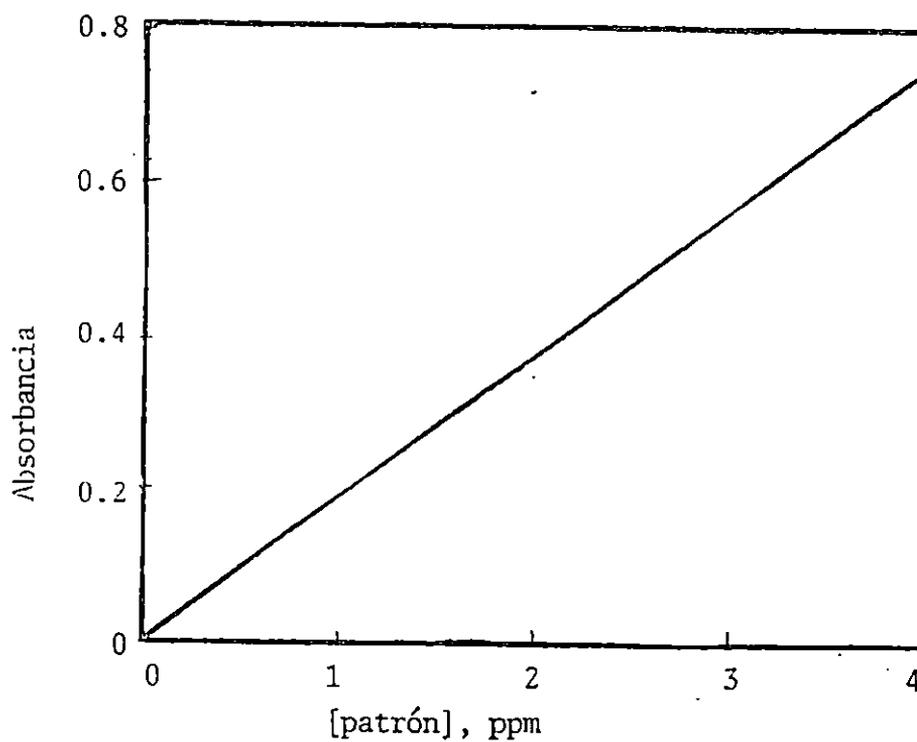


Fig.A.2 Curva de calibración para hierro acomplejado

A.2 DETERMINACION DE MANGANESO

A.2.1 Determinación de Manganeso Total y Manganeso Soluble

Reactivos:

- a) Acido sulfúrico, concentrado.
- b) Acido nítrico, concentrado.
- c) Acido fosfórico, en jarabe, solución al 85 por 100.
- d) Peryodato:
 - i) Metaperyodato de potasio, KIO_4 sólido o
 - ii) Peraperyodato de sodio, $Na_3H_2IO_6$ sólido.
- e) Nitrato de plata.
- f) Solución patrón de sulfato de manganeso:
 - i) Preparación de solución de $KMnO_4$ 0.1N: Se pesan 3.2 gramos de $KMnO_4$ se disuelven en 300 ml de agua destilada, se cubre con un vidrio de reloj, se calienta llevando a ebullición por una hora, se deja la solución en reposo en la oscuridad por lo menos un día, se filtra la solución a través de un crisol Gooch o lana de vidrio, se afora a un litro y guardar la solución en un frasco ámbar.

Estandarización de la solución de $KMnO_4$: se seca en la estufa oxalato de sodio, $Na_2C_2O_4$, por una hora a 105-110 grados centígrados, se pesan tres muestras de 0.3 gramos de oxalato de sodio, disolver la muestra en 250 ml de H_2SO_4 5% p/v, se titula con $KMnO_4$ estándar, hasta que aparezca el

primer color rosado en la solución, se calienta la solución a 60 grados centígrados y se completa la titulación hasta que el color rosado persista 30 segundos.

$$N = (Wxp) / (mxtx100)$$

Donde:

N = normalidad de la solución de permanganato de potasio.

W = peso de la muestra de oxalato de sodio (g).

p = pureza del oxalato de sodio.

m = miliequivalentes de oxalato de sodio.

t = titulante (ml).

ii) Calcular el volumen de esta solución para preparar un litro del patrón con una concentración de 0.005 mg de Mn/ml, (50 ppm de Mn) por la ecuación A.2.

$$1 \text{ ml KMnO}_4 = 4.55 / N. \quad (\text{A.2})$$

A este volumen se agregan de 2 a 3 ml de H_2SO_4 concentrado, y a continuación, solución de bisulfito de sodio (10 gramos de NaHSO_3 más 100 ml de agua destilada, a gotas con agitación constante, hasta que desaparezca el color del permanganato. Se hierve para eliminar el exceso de SO_2 se enfría y se diluye a un litro con agua destilada. Esta solución se puede diluir aún más, para cuantificar pequeñas cantidades de manganeso.

- g) Solución de peróxido de hidrógeno, al 30 por 100.
 h) Soluciones patrón de manganeso.

Preparados el día que serán utilizados de la manera descrita en la tabla A.4, partiendo de una solución madre de 50 ppm diluyendo al aforo en un volumétrico de 50 ml.

TABLA A.4
 VOLUMENES DE SOLUCION MADRE NECESARIO PARA LA
 LA PREPARACION DE SOLUCIONES PATRON DE MANGANESO

Patrón (ppm)	Vol. solución madre (ml)
1	1
2	2
3	3
4	4

Procedimiento:

Pretratamiento de las muestras: para eliminar el cloruro y otras sustancias oxidables, como materia orgánica, se toma una porción alícuota adecuada de la muestra y se le agregan 5 ml de H_2SO_4 concentrado y 5 ml de HNO_3 concentrado, mezclando entre las adiciones. Se evapora a humos de SO_3 , se enfría, se agregan 85 ml de agua destilada y se enfría de nuevo. Se agregan 5 ml de HNO_3 y 5 ml de H_3PO_4 y se mezcla. Se trata como se describe en la sección de oxidación, comenzando con "... se agrega 0.3 gramos de KIO_4 ".

Oxidación: A una porción alícuota adecuada de la muestra se agregan 5 ml de H_2SO_4 concentrado, se mezcla y se enfría. Se agregan 5 ml de HNO_3 y 5 ml de H_3PO_4 y se mezcla. Se concentra por ebullición a unos 90 ml. Se enfría, se agrega 0.3 g de KIO_3 ó 0.5 g de $Na_3H_2IO_6$. Si la cantidad de Mn es de 0.01 mg o menos, se agregan también 20 mg de $AgNO_3$. Se calienta a ebullición, con agitación, y se conserva en el punto de ebullición, o ligeramente abajo, por 10 minutos (o cuando menos por 1 hora para cantidades muy pequeñas de Mn). Se enfría, se diluye a 100 ml con agua destilada exenta de substancias reductoras y se mezcla. Se compara visualmente, o se mide fotométricamente, usando patrones que contengan 0, 0.005, etc., a 1.5 mg de Mn, que se preparan tratándo las cantidades debidas de la solución patrón de Mn. Las mediciones fotométricas se practican contra un blanco de agua destilada.

Medición del color:

Se procede de la misma forma descrita en el análisis de hierro total y hierro soluble.

Cálculo:

Los cálculos se realizan de la misma manera como se describe en el análisis de hierro total y soluble (28).

En la tabla A.5 se presentan los valores de absorbancia para los patrones de manganeso y se grafican en la figura A.3

TABLA A. 5
VALORES DE ABSORBANCIA PARA PATRONES DE MANGANESO

PATRON	Ap	CV (%)
1 ppm	0.04	1.8
2 ppm	0.0575	0.61
3 ppm	0.096	0
4 ppm	0.111	3.26

Ap = Absorbancia promedio de dos repeticiones.
CV(%) = Coeficiente de variación.

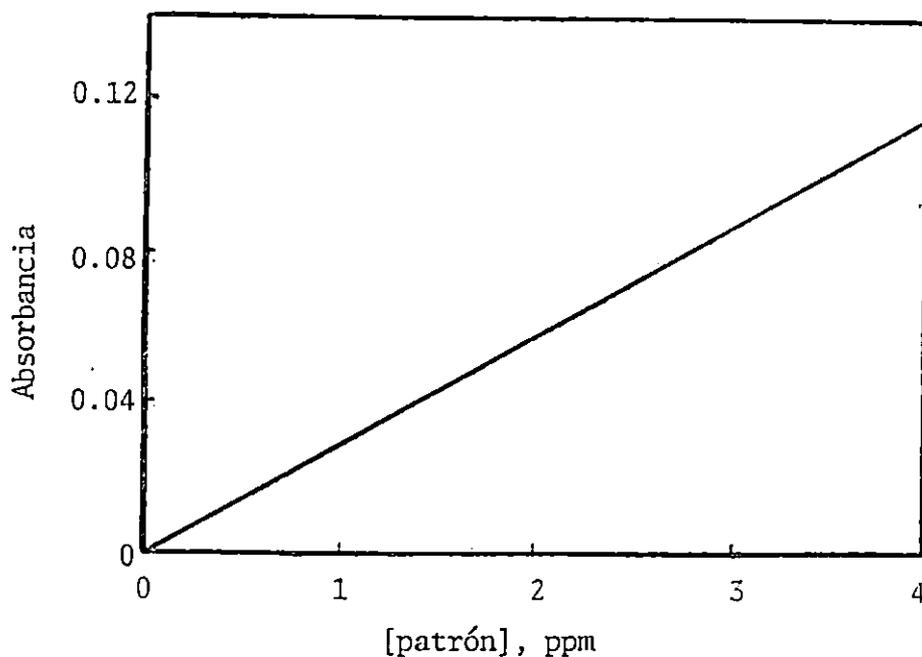


Fig. A.5 Curva de calibración para manganeso total-manganeso soluble.

A.3 ANALISIS MICROBIOLÓGICOS

A.3.1 Determinación de Bacterias Coliformes Totales

1. Prueba Presuntiva

Medio de cultivo: Caldo Lactosado

Se esteriliza el área de trabajo y toda actividad se realiza bajo área de mechero. Se rotulan para cada muestra de agua, 5 tubos de fermentación con la fecha, hora, lugar de muestreo y número de tubo. Se inoculan cada uno de los 5 tubos de fermentación con 10 ml de muestra y se ponen a incubar a 35 ± 0.5 grados centígrados, durante 48 ± 2 horas en total. Los tubos se examinan cada 24 horas, se agitan y se hacen anotaciones sobre la presencia o ausencia de gas y cualquier otra observación.

Los tubos que muestran formación de gas (prueba presuntiva positiva) se someten a la prueba confirmada y a la prueba de determinación o identificación de coliforme fecal.

2. Prueba Confirmativa

Medio de cultivo: Caldo de Bilis Verde Brillante (BVB)

Se agita el tubo de fermentación primario y se transfiere con una asa una gota del contenido de los tubos que resultaron positivos en la prueba presuntiva, y se incuban a tubos con caldo de BVB a $37.5 - 38^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas, se observa si hay formación de gas cada 24 horas y se ha-

hacen las anotaciones correspondientes.

A.3.2 Recuento en Placa de Bacterias Mesófilas Totales

Esta prueba permite obtener una estimación del número total de las bacterias que se desarrollan a 35 grados centígrados en 24 horas y bajo las condiciones de alimentación y humedad especificadas.

Medio de cultivo: Tripticasa Soya Agar (TSA)

Procedimiento

Se rotulan las cajas Petri, previamente esterilizadas, con la fecha, hora, lugar de muestreo. Se hacen diluciones, en tubos de ensayo de tapón roscado, de 1:10, 1:100 y 1:1000. Se funde el agar esterilizado por inmersión en agua hirviendo. Se enfría el agar hasta 45°C y se mantiene entre 43-45°C en baño de agua. Se agitan vigorosamente los tubos de la muestra y sus diluciones, mediante movimiento de arriba hacia abajo 25 veces. De manera aséptica se pasa 1 ml de la muestra bien mezclada a una caja Petri, cada siembra se hace por duplicado. Se agregan de 10 a 15 ml de agar fundido y enfriado a 43°C, se mezcla por movimiento rotatorio, el cual se imprime a la caja Petri sobre la mesa de trabajo. Se deja endurecer el medio y se incuba a 34-36°C. Después de 48 horas se cuenta el número de colonias formadas, sobre o dentro del medio (32).

ANEXO B

PRUEBAS EXPERIMENTALES:

- 1) Prueba de Sedimentación
- 2) Demanda de Cloro

1. Prueba de Sedimentación

Material y Equipo:

1. Aireador
2. Difusor de menor diámetro de orificio
3. Compresor
4. Agua cruda

Procedimiento

- a. Airear un volumen de agua cruda de 20 galones durante 15 minutos.
- b. Finalizada la aireación, dejar reposar el agua durante 2 horas, tomando muestras de la parte clarificada, a intervalos de 15 minutos.
- c. A cada una de las muestras tomadas determinar la concentración de hierro soluble.
- d. Con los datos obtenidos elaborar una figura en la cual se grafica: concentración de hierro soluble contra tiempo de reposo o tiempo de reacción y sedimentación.

- e. Del gráfico resultante seleccionar los tiempos más convenientes para garantizar una oxidación adecuada.

2. Determinación de la Demanda de Cloro

Material y Equipo:

1. Recipiente de 1 galón de capacidad
2. Cronómetro
3. Compresor con válvula de aguja
4. Balanza granataria
5. Kit de cloro DPD

Procedimiento

- a. Tomar una muestra de agua cruda de 1 galón.
- b. Con la ayuda del compresor y válvula de aguja, airear la muestra durante 30 minutos y permitir un tiempo de reposo de 15 minutos.
- c. Adicionar 0.5 gramos de Hipoclorito de Calcio al 65%, previamente pesado en balanza granataria.
- d. Proporcionar un tiempo de contacto y agitación manual de 20 minutos.
- e. Medir el Cloro residual con el Kit de cloro DPD
- f. Si la concentración de cloro residual es elevada, repetir los pasos anteriores, disminuyendo la cantidad de hipoclorito de calcio adicionado, y si por el contrario el cloro residual es bajo, aumentar la cantidad de

- este producto químico adicionada.
- g. La prueba se repite hasta obtener una concentración de cloro residual entre 0.5 y 1 ppm.
 - h. Una vez obtenida la concentración de cloro residual deseada, determinar la cantidad de hipoclorito de calcio necesario, adicionar a 20 gal de agua (volumen de agua tratada en cada una de las corridas experimentales del sistema construido).
 - i. Determinar el equivalente en ppm de cloro adicionado a 20 gal de agua.
 - j. Determinar la demanda de cloro.

Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la determinación de la demanda de cloro se presenta en la tabla B.1.

TABLA B.1
DETERMINACION DEL HIPOCLORITO DE CALCIO
REQUERIDO POR GALON DE AGUA

<u>g</u> HIPOCLORITO DE CALCIO gal DE AGUA CRUDA	CLORO RESIDUAL (ppm)
0.5	3.5
0.4	3.5
0.3	3.5
0.2	2.5
0.1	1.5
0.05	1.0

Cálculos:

- a. Cálculo del Hipoclorito de Calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) requerido en 20 galones de agua.

$$\begin{aligned} \text{Hipoclorito de calcio requerido} &= \frac{0.05 \text{ g } (\text{Ca}(\text{OCl})_2)}{1 \text{ gal. de agua}} \times 20 \text{ gal. de agua} \\ &= 1 \text{ g de Ca } (\text{OCl})_2 \end{aligned}$$

- b. Cálculo de las ppm de cloro adicionado a 20 gal. de agua

$$\begin{aligned} \text{ppm de cloro} &= \frac{1 \text{ g } \text{Ca}(\text{OCl})_2}{20 \text{ gal de agua}} \times \frac{0.65 \text{ g de Cl}}{1 \text{ g } \text{Ca}(\text{OCl})_2} \times \\ &\quad \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \\ &= 8.6 \text{ mg /L} \\ &= 8.6 \text{ ppm} \end{aligned}$$

- c. Cálculo de la demanda de cloro.

$$\begin{aligned} \text{Demanda de cloro} &= \text{Cloro Adicionado} - \text{Cloro Residual} \quad (\text{ecuación B.1}) \\ &= 8.6 \text{ ppm} - 1 \text{ ppm} \\ &= 7.6 \text{ ppm} \end{aligned}$$

ANEXO C

DETERMINACION DE LAS ESPECIFICACIONES DE TRABAJO EXPERIMENTAL DEL FILTRO Y DE LA BOMBA QUE LO ALIMENTA

A) Especificaciones de Trabajo Experimental del Filtro

1. Cantidad de agua utilizada en la deaireación del filtro.

Pasos:

1. Abrir el orificio desaireador.
2. Encender la bomba, para permitir la entrada de agua al filtro por el fondo de éste y alimentarlo hasta el momento que el agua comience a salir por el orificio desaireador.
3. Inmediatamente cerrar el orificio desaireador y apagar la bomba.
4. Colectar el agua contenida en el filtro, permitiendo su salida por el fondo de éste.
5. Medir la cantidad de agua recolectada (agua contenida en el filtro).

La cantidad de agua recolectada fue de 0.03011 m^3 , que es la cantidad de agua que se utiliza para desairear el filtro

2. Tiempo de residencia del agua en el proceso de deaireación del filtro.

Es el tiempo que la bomba ocupa para deairear el filtro, se determina por la ecuación C.1.

$$t_{df} = \frac{Vol}{Q_B} \quad (\text{ecuación C.1})$$

Donde:

t_{df} = Tiempo de deaireación del filtro.

Vol = Volumen de agua utilizada en la deaireación del filtro.

Q_B = Flujo de agua proporcionada por la bomba.

Datos:

$$Vol = 0.03011 \text{ m}^3$$

$$Q_B = 0.34065 \text{ m}^3/\text{h}$$

Cálculos

$$\begin{aligned} t_{df} &= \frac{Vol}{Q_B} \\ &= \frac{0.03011 \text{ m}^3}{0.34065 \text{ m}^3/\text{h}} \\ &= 0.09 \text{ h} \\ &= 5.4 \text{ min} \end{aligned}$$



3. Tasa o velocidad de filtración

Es la velocidad del agua a través del lecho filtrante, se calcula utilizando la ecuación C.2 (61)

$$T = \frac{Q}{A} \quad (\text{ecuación C.2})$$

Donde:

T = Velocidad de filtración.

Q = Flujo de agua a la salida del filtro.

A = Area del lecho filtrante

Datos:

$$Q_{\max} = 0.3169 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\min} = 0.1589 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$D = 0.1524 \text{ m}^2$$

Cálculos:

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

D = Diámetro del filtro

$$A = \frac{\pi \times (0.1524 \text{ m})^2}{4}$$

$$= 0.01824 \text{ m}^2$$

$$T_{\max} = \frac{Q_{\max}}{A}$$

$$= \frac{0.3128 \text{ m}^3/\text{h}}{0.01824 \text{ m}^2}$$

$$= 17.15 \text{ m} / \text{h}$$

$$\begin{aligned}
 T_{\min} &= \frac{Q_{\min}}{A} \\
 &= \frac{0.1586 \text{ m}^3/\text{h}}{0.01824 \text{ m}^2} \\
 &= 8.7 \text{ m/h.}
 \end{aligned}$$

4. Velocidad de limpieza

Se calcula utilizando la ecuación C.3 (61)

$$V_1 = \frac{Q_1}{A} \quad (\text{ecuación C.3})$$

Donde:

V_1 : Velocidad de limpieza.

Q_1 : Flujo de agua alimentado al filtro para su limpieza.

Datos:

Q_1 : 0.34065 m³/h

A : 0.01824 m²

Cálculos:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{0.34065 \text{ m}^3/\text{h}}{0.01824 \text{ m}^2} \\
 &= 18.68 \text{ m/h}
 \end{aligned}$$

5. Cantidad de agua usada en la limpieza del filtro (61)

$$V_{H_2O} = Q_1 \times t_1 \quad (\text{Ecuación C.4})$$

Donde:

V_{H_2O} = Volumen de agua usada en la limpieza del filtro.

t_1 = Tiempo de limpieza.

Datos:

$$Q_1 = 0.34065 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t_1 = 10 \text{ min}$$

Cálculos:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 0.34065 \text{ m}^3/\text{h} \times 10 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \\ &= 0.056775 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6. Tiempo de residencia del agua en la etapa de filtración (56)

$$tr = \frac{V_{H_2O} \text{ aireada}}{Q} \quad (\text{Ecuación C.5})$$

Donde:

tr = Tiempo de residencia.

V_{H_2O} = Volumen de agua aireada.

Q = Flujo de agua a la salida del filtro

Datos:

$$V_{H_2O} \text{ aireada} = 0.0757 \text{ m}^3$$

$$Q_{\max} = 0.3169 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\min} = 0.1589 \text{ m}^3/\text{h}$$

Cálculos:

$$tr_{\max} = \frac{0.0757 \text{ m}^3}{0.3169 \text{ m}^3/\text{h}} = 0.24 \text{ h} \cdot x \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$= 0.24 \text{ h} \quad = 14.4 \text{ min}$$

$$tr_{\min} = \frac{0.0757 \text{ m}^3}{0.1589 \text{ m}^3/\text{h}} = 0.48 \cdot x \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$= 0.48 \text{ h} \quad = 28.8 \text{ min}$$

B)

1. Capacidad

Se determina por un método simple de medición de flujo; que consiste en medir el tiempo que el flujo descargado por la bomba tarda en llenar un recipiente de volumen conocido.

La cantidad de flujo de agua descargada por la bomba es: $0.34065 \text{ m}^3/\text{h}$

2. Voltaje

Se determinó por medio de un voltímetro conectado en paralelo a la bomba en funcionamiento (63,66). La lectura proporcionada por el voltímetro fue: 118 volt.

3. Corriente

La corriente consumida por la bomba se determinó con la ayuda de un amperímetro conectado en serie a la bomba (63,66). La corriente consumida fue de 8 A.

4. Potencia Proporcionada por la Bomba

La potencia proporcionada por la bomba es la energía suministrada por una fuente externa y consumida por la bomba para vencer una carga dada (62). Se calcula por la ecuación C.6 (63).

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Voltaje de trabajo}}{\text{trabajo}} \times \frac{\text{Energía consumida}}{\text{consumida}} \quad (\text{Ecuación C:6})$$

$$= 118 \times 8 \text{ A}$$

$$= 944 \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \times \frac{1 \text{ hp}}{0.7457 \text{ kW}}$$

$$= 1.27 \text{ hp}$$

TABLA F.2
TIEMPO REQUERIDO PARA REALIZAR UNA CORRIDA

E T A P A	TIEMPO DE RESIDENCIA (h)
Aireación	0.5
Reacción y sedimentación	0.25
Cloración	0.33
Filtración	0.24
Sub Total (Tiempo de residencia del agua en el sistema)	1.32
Evacuación del agua retenida en el aireador	0.25
Llenado del tanque aireador	0.25
Total (Tiempo requerido para realizar una corrida)	1.82

Considerando días de 8 horas de trabajo y la necesidad de efectuar deaireaciones del filtro, así como limpiezas de éste y sistema de tuberías; las 14 corridas se efectúan en 3.5 días de la siguiente manera:

4 corridas/día, durante los 3 primeros días
2 corridas/día, el cuarto día de trabajo

Cada día con su respectiva deaireación y limpieza cuando es requerida (al reiniciar la operación del siste-

TABLA F.1
 ESPECIFICACIONES DE TRABAJO UTILIZADAS
 PARA PRODUCIR 1.06 m³ DE AGUA

ESPECIFICACION DE TRABAJO	V A L O R
Volumen de agua aireada	20 gal/min (0.0757 m ³ /h)
Tiempo de aireación	30 min (0.5 h)
Tiempo de reacción y sedimentación	15 min (0.25 h)
Hipoclorito de calcio adicionado	1 g
Tiempo de contacto (cloración)	20 min (0.333 h)
Flujo de agua	1.4 gal/min (0.3169 m ³ /h)
Volumen de agua utilizado en la deaireación del filtro	0.03011 m ³ /h
Tiempo requerido para la deaireación del filtro	5.4 min (0.09 h)
Tiempo de residencia del agua en la etapa de filtración	14.4 min (0.24 h)
Tiempo de limpieza	10 min (0.17 h)

Con las especificaciones de la tabla F.1, el tiempo de residencia del agua en el sistema es de 1.33 h y el requerido para realizar 1 corrida es de 1.83 h. La determinación de estos tiempos se presenta en la tabla F.2.

ANEXO F

DETERMINACION DE LOS COSTOS DE PRODUCCION

El sistema construido para la remoción de hierro y manganeso trabaja en forma discontinua, con una producción de agua, por lote o corrida, de 0.0757 m^3 ; obtenida a las mejores condiciones de trabajo del sistema, determinadas experimentalmente (ver tabla F.1).

Producir 1 m^3 de agua en el sistema, a estas condiciones, requiere la realización de 13.2 corridas.

Con el objetivo de proporcionar el mismo tratamiento a cada una de las corridas, los costos de producción se determinan para la realización de 14 corridas, que equivalen a una producción de agua de 1.06 m^3 .

Las condiciones de trabajo del sistema con las cuales se realizan las 14 corridas se muestran en la tabla F.1.

TABLA E.3

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PREPARACION DEL LECHO FILTRANTE DE
TAMAÑO EFECTIVO 1.18 mm Y COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE 1.4

N° DE TAMIZ	ABERTURA mm	% DE MATERIAL QUE PASA	% RETENIDO ACUMULATIVO	% RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	DENSIDAD g/m ³	MASA TOTAL DE LAVA REQUERIDA (g)	PESO RETENIDO PARCIAL PARA MASA TOTAL (g)
10	2	80	20	20	20			3851.76
12	1.7	60	40	20	20			3851.76
16	1.18	10	90	50	50	1320000.0	19258.8	9629.4
20	0.85	1	99	9	9			1735.29
Fondo		0	100	1	1			192.50
Muestra de lava utilizada para determinar la densidad del lecho					100	Masa total de lava requerida		19258.8

$$V_{1F} = 0.01459 \text{ m}^3$$

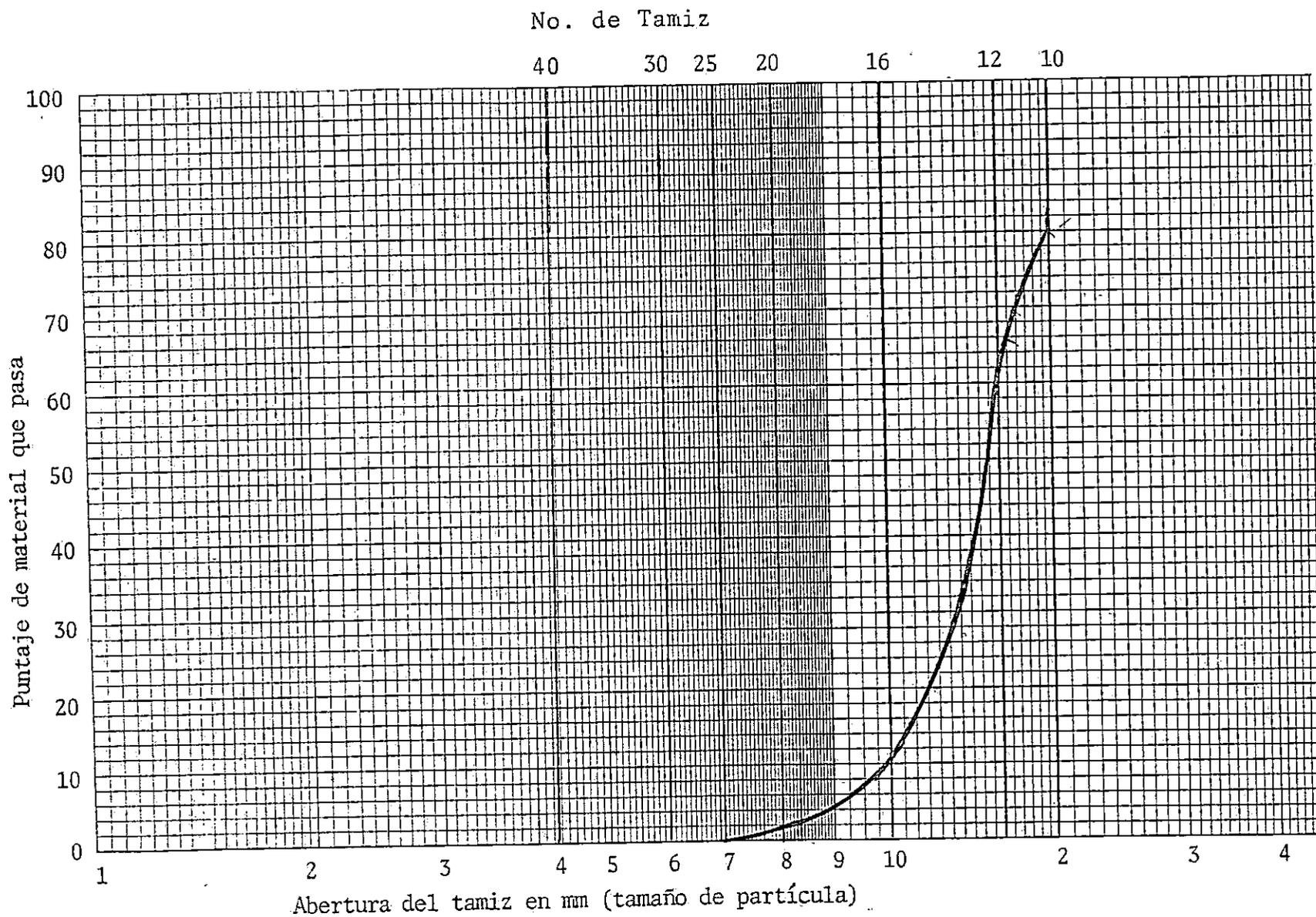


Fig. E.3 Curva granulométrica diseñada para el lecho filtrante con tamaño efectivo de 1.18 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4.

5. Formación del Lecho Filtrante con Tamaño Efectivo de 0.6 mm y Coeficiente de Uniformidad de 1.4

Consiste en pesar las cantidades de lava volcánica por tamiz requeridas (cuarta columna de la tabla E.2) para mezclarlas, posteriormente y obtener así la masa total de lecho filtrante deseada.

6. Esterilización

Una vez formado el lecho filtrante, se esteriliza en una estufa a 150°C durante 4 horas.

B) Curva Granulométrica Diseñada y Resultados Obtenidos en la Preparación del Lecho Filtrante de TE = 1.18 mm y CU = 1.4

La masa de lava requerida por tamiz se determina utilizando la ecuación E.2 y los resultados obtenidos se presentan en la tabla E.2.

TABLA E.2

GRAMOS DE LAVA POR TAMIZ QUE FORMAN EL LECHO FILTRANTE DE TAMAÑO EFECTIVO; 0.6 mm Y COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE 1.4

N° DE TAMIZ	ABERTURA	% RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO PARCIAL (g)
16	1.18	2	393.93
20	0.85	38	7484.67
25	0.71	30	5908.95
30	0.6	20	3939.30
40		8	1575.72
Fondo		2	393.93
Masa total requerida por lecho filtrante			19696.59.

3. Pulverización

Se pulveriza la piedra volcánica triturada a la abertura(s) de disco con la(s) que se obtiene(n) los números de tamices requeridos (1era columna de la tabla E.2).

4. Tamizado

Tiene como objetivo separar por tamaño la piedra volcánica pulverizada.

El proceso de tamizado se realiza mecánicamente a través de un vibrador.

Datos:

$$D = 0.1524 \text{ m}$$

$$h = 0.8 \text{ m}$$

$$\pi = 3.141592653$$

Cálculo:

$$V_{1f} = \frac{\pi (0.1524 \text{ m})^2}{4} \times 0.8 \text{ m}$$

$$V_{1f} = 0.01459 \text{ m}^3$$

- c.4 Calcular la masa total de lava requerida en el filtro y las diferentes cantidades de lava por tamiz que forman la masa total requerida.

La masa total requerida se calcula utilizando la ecuación E.5.

$$\text{Masa total requerida} = \text{Densidad de la lava} \times V_{1f} \quad (\text{Ecuación E.5})$$

Datos:

$$\text{Densidad de la lava} = 1.35 \text{ g/cm}^3$$

$$V_{1f} = 0.01459 \text{ m}^3$$

Cálculo:

$$\text{Masa total requerida} = 1.35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 0.01459 \text{ m}^3 \times \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3}$$

$$= 19696.5 \text{ g}$$

$$= 19.7 \text{ kg}$$

Para la muestra de lava formada, los datos obtenidos fueron:

Peso de la probeta limpia = 235.4 g

Peso de probeta más
muestreo de lava = 335 g

Volumen ocupado por la
muestra de lava = 74 cm³

Cálculos realizados:

$$\begin{aligned} \text{Peso de la muestra} &= \text{Peso de probeta} + \text{Peso de probeta} \\ &\quad \text{muestra de lava} \quad - \text{Peso de probeta} \\ &= (335 - 235.4) \text{ g} \\ &= 99.6 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Densidad} &= \frac{99.6 \text{ g}}{74 \text{ cm}^3} \\ &= 1.35 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

c.3 Calcular el volumen que el lecho filtrante ocupa a la mayor altura de trabajo (0.6 m).

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{1f} = \frac{\pi D^2}{4} \times h \quad (\text{Ecuación E.4})$$

Donde:

V_{1f} = Volumen del lecho filtrante

D = Diámetro del filtro

h = Altura del filtro

El análisis granulométrico consiste en hacer pasar la muestra de 100 gramos de lava pulverizada a través de un juego de mallas, por medio de agitación manual o mecánica; pesando, posteriormente, la lava retenida en cada tamiz.

El análisis granulométrico tiene como objetivos:

- Determinar que abertura(s) de disco del pulverizador proporciona(n) mayor rendimiento para obtener los tamices requeridos en la curva diseñada.
- Obtener la muestra de 100 gramos de lava con TE = 0.6 mm y CU = 1.4 (determinada en el paso 2b) para calcular su densidad.

c.2 Determinar la densidad de la muestra de 100 gramos de lava.

Pasos:

- Pesar una probeta limpia.
- Pesar la probeta más una pequeña cantidad de la muestra de lava formada.
- Medir el volumen que ocupa esta cantidad de lava.
- Calcular su densidad, con la ecuación E.3:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa de lava}}{\text{Volumen que ocupa la masa de lava}}$$

(Ecuación E.3)

TABLA E.1

DETERMINACION DE LOS GRAMOS DE LAVA POR TAMIZ
REQUERIDOS PARA FORMAR UNA MUESTRA DE 100 GRAMOS
DE LECHO FILTRANTE CON TAMAÑO EFECTIVO DE 0.6 mm
Y COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE 1.4

N° DE TAMIZ	ABERTURA mm	% DE MATERIAL QUE PASA	% RETENIDO ACUMULATIVO	% RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO PARCIAL (g)
16	1.18	98	2	2	2
20	0.85	60	40	38	38
25	0.71	30	70	30	30
30	0.6	10	90	20	20
40	0.425	2	98	8	8
Fondo	--	0	100	2	2
Peso retenido parcial total					100

- c. Con los datos generados en el paso anterior, determinar la cantidad de lava por tamiz que el pulverizador debe proporcionar para obtener la cantidad total de lecho filtrante requerida, a las características deseadas ($TE = 0.6$ mm y $CU = 1.4$).

Los pasos y cálculos que se realizan son:

- c.1 Efectuar pulverizados a diferentes aberturas del disco del pulverizador (1, 2 y 3 mm) tomando en cada una de estas aberturas, muestras de 100 gramos de lava, a las cuales se les hace un análisis granulométrico.

Para el tamiz 20

$$\% \text{ retenido parcial} = \% \text{ retenido acumulativo (tamiz 20)} - \% \text{ retenido acumulativo (tamiz 16)}$$

Para el tamiz 25

$$\% \text{ retenido parcial} = \% \text{ retenido acumulativo (tamiz 25)} - \% \text{ retenido acumulativo (tamiz 20)}$$

Para el tamiz 30

$$\% \text{ retenido parcial} = \% \text{ retenido acumulativo (tamiz 30)} - \% \text{ retenido acumulativo (tamiz 25)}$$

De igual forma se calcula para los tamices restantes (40 y fondo).

- b.4 Calcular el peso retenido parcial (cantidad de lava requerida por tamiz para formar la muestra de 100 g de lava, paso 2.b)

$$\text{Peso retenido parcial} = \text{Peso total de la muestra} \times \% \text{ retenido parcial}$$

$$= 100 \times \% \text{ retenido parcial}$$

(ecuación E.2)

La información obtenida a través de los pasos b.1, b.2, b.3 y b.4 se presenta en la tabla E.1.

- b. Una vez diseñada la curva, se determina la cantidad de lava requerida por tamiz (tamaño de partícula) para formar una muestra de 100 gramos de lava con tamaño efectivo (TE) de 0.6 mm y coeficiente de uniformidad (CU) de 1.4.

Esta información se obtiene a partir de la figura E.2 de la siguiente manera:

- b.1 De la curva granulométrica diseñada, leer para cada tamiz el porcentaje de material que pasa.
- b.2 Calcular el porcentaje retenido acumulativo con la ecuación D.1

$$\begin{aligned} \% \text{ retenido} \\ \text{acumulativo} \end{aligned} = 100 - \% \text{ de material que pasa} \quad (\text{Ecuación E.1})$$

- b.3 Calcular el porcentaje retenido parcial.

La forma en que se determina este porcentaje se presenta tomando como ejemplo los datos generados en los pasos b.1 y b.2 que se muestran en la tabla E.1.

Para el tamiz 16

$$\begin{aligned} \% \text{ retenido parcial} \\ (\text{ tamiz 16 }) \end{aligned} = \% \text{ retenido acumulativo} \\ (\text{ tamiz 16 })$$

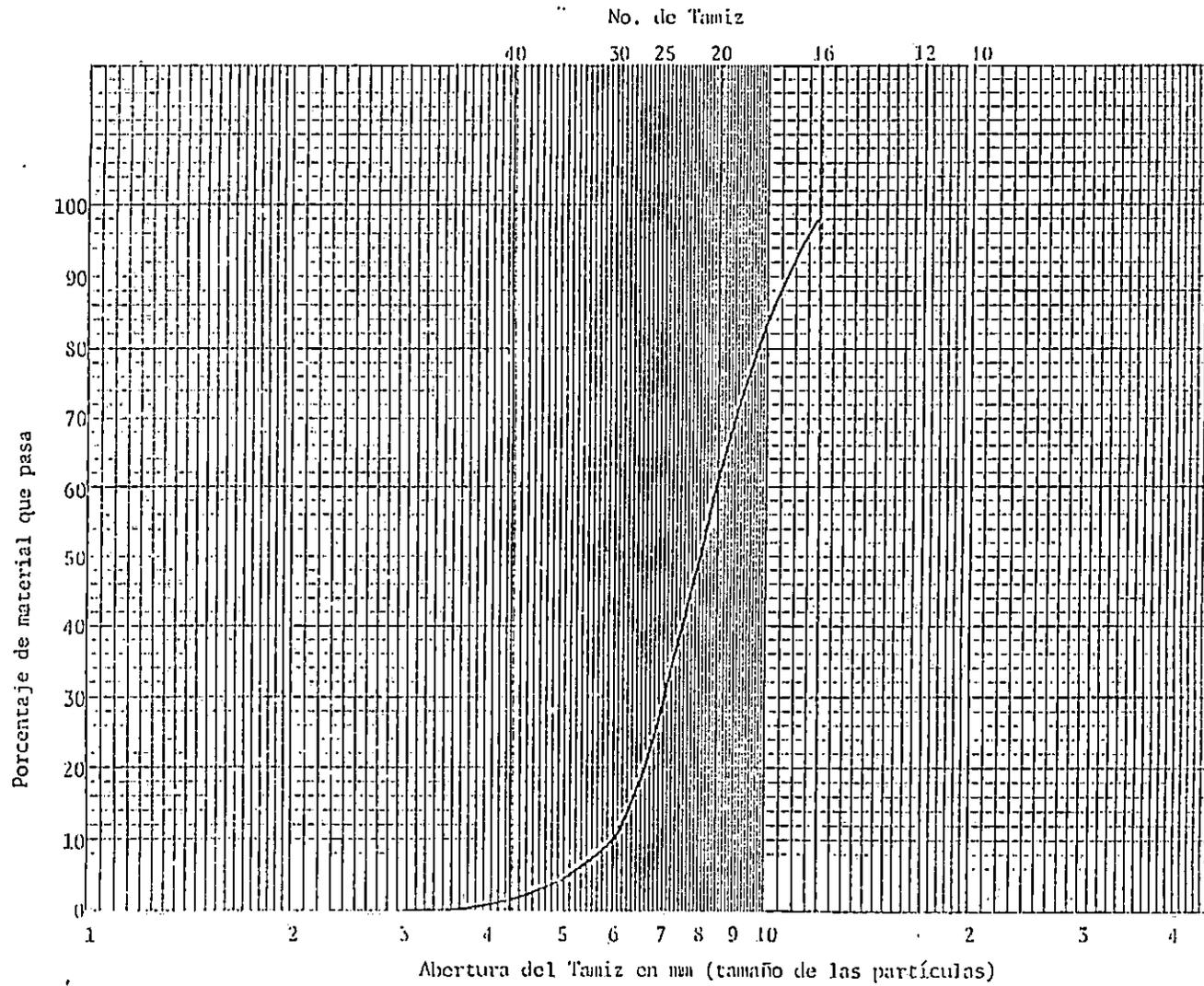


Fig. E.2 Curva granulométrica diseñada para el lecho filtrante con tamaño efectivo de 0.6 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4.

te de lava volcánica de tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad seleccionados.

Su diseño se realiza a prueba y error con números de tamices, de la serie Standard Testing Sieve, cercanos al tamaño efectivo seleccionado.

Los pasos para determinar los números de tamices y la cantidad de lava requerida por tamiz son:

- a. En un gráfico: % de material que pasa vrs. número de tamiz (tamaño de partícula) diseñar una curva granulométrica de manera que el tamaño efectivo sea de 0.6 mm y el coeficiente de uniformidad de 1.4.

La curva granulométrica diseñada se muestra en la figura E.2.

Nota:

Tamaño efectivo: tamaño de partículas correspondiente al porcentaje de material que pasa el 10% (P_{10}).

Coeficiente de uniformidad: Relación entre los tamaños de partículas correspondiente al porcentaje de material que pasa el 60% y 10% (P_{60}/P_{10}).

De la figura E.2 se lee:

$$\text{Tamaño efectivo} = P_{10} = 0.6 \text{ mm.}$$

$$\text{Coeficiente de uniformidad} = \frac{P_{60}}{P_{10}} = \frac{0.85}{0.6} = 1.4$$

En este trabajo se han preparado dos lechos filtrantes de lava volcánica: uno con tamaño efectivo (TE) de 0.6 mm y coeficiente de uniformidad (CU) de 1.4, y el otro con tamaño efectivo de 1.18 mm e igual coeficiente de uniformidad que el anterior.

Los pasos y cálculos realizados en la preparación de ambos lechos filtrantes básicamente son los mismos; por lo que con fines ilustrativos se describen para el lecho filtrante de tamaño efectivo 0.6 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4, presentando para el otro lecho filtrante (TE = 1.18 mm y CU = 1.4) únicamente la curva granulométrica diseñada (Fig. E.3) y los resultados obtenidos (Tabla E.3).

A) Pasos y Cálculos Realizados en la Preparación del Lecho Filtrante de TE = 0.6 mm y CU = 1.4

1. Trituración

Tiene como objetivo reducir la piedra volcánica hasta un tamaño aceptable por el pulverizador.

Se realiza por medio de un triturador de mandíbulas.

2. Diseño de la Curva Granulométrica

Permite determinar los tamaños de partículas de lava (número de tamices) y la cantidad de éstos, que el pulverizador debe proporcionar para obtener el lecho filtrante.

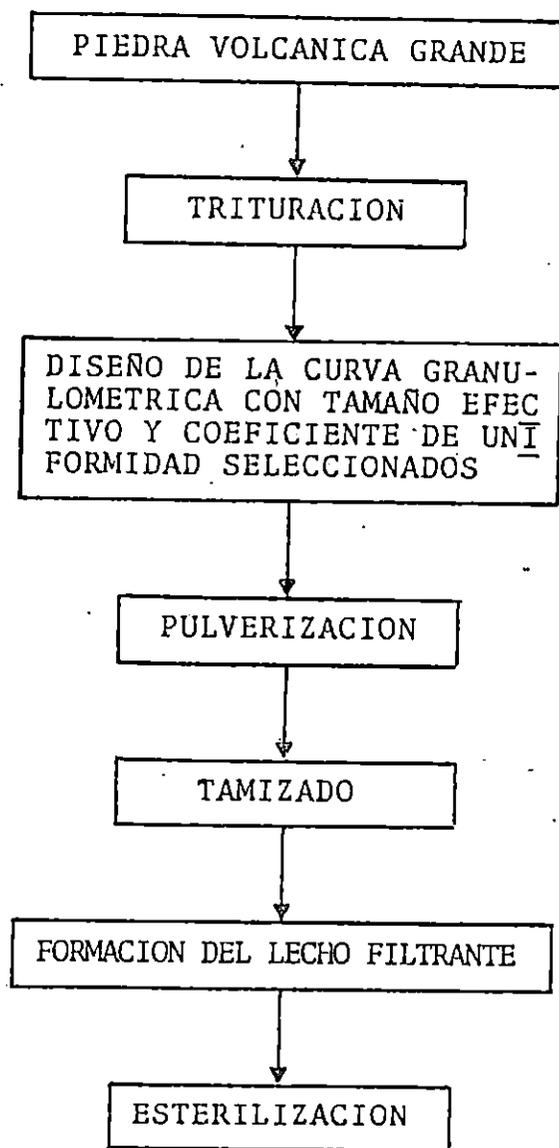


Fig. E.1 Algoritmo para la preparación del lecho filtrante (piedra volcánica).

ANEXO E

PREPARACION DE LA PIEDRA VOLCANICA

La lava volcánica procedente de los bancos está formada por piedras grandes; por lo que para utilizarla como lecho filtrante es necesario reducirla de tamaño y proporcionarle un coeficiente de uniformidad que evite la cohesión de los granos de lava en el filtro.

La reducción de tamaño se efectúa mediante el uso de un triturador y de un pulverizador; proporcionándole posteriormente, el tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad seleccionados, mediante un proceso de tamizado.

También, a la piedra volcánica se le proporciona un proceso de asepsia, para eliminar los microorganismos presentes en ésta, provenientes del aire y suelo de donde se extrajo la piedra.

La preparación del lecho filtrante (piedra volcánica) se realizó en el Instituto de Investigaciones Tecnológicas (GEOTECNICO) y la secuencia de las etapas que se realizaron se muestra en la figura E.1.

TABLA D.2
VALORES DE F CRITICO PARA DETERMINADOS GRADOS
DE LIBERTAD DEL ERROR Y NIVELES DE SIGNIFICANCIA (53)

Grados de libertad para el denominador	%	Grados de libertad para el numerador (mayor cuadrado medio)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	20
1	.10	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.89	60.20		60.70		61.22		61.74
	.05	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242		244	245		246	248
	.01	4,052	4,999	5,403	5,625	5,764	5,859	5,928	5,981	6,022	6,056	6,082	6,106	6,142		6,169	6,208
2	.10	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39		9.41		9.42		9.44
	.05	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.36	19.37	19.38	19.39	19.40	19.41	19.42		19.43	19.44
	.01	98.49	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.34	99.36	99.38	99.40	99.41	99.42	99.43		99.44	99.45
3	.10	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23		5.22		5.20		5.18
	.05	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.88	8.84	8.81	8.78	8.76	8.74	8.71		8.69	8.66
	.01	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.34	27.23	27.13	27.05	26.92		26.83	26.69
4	.10	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92		3.90		3.87		3.84
	.05	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.93	5.91	5.87		5.84	5.80
	.01	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.54	14.45	14.37	14.24		14.15	14.02
5	.10	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30		3.27		3.24		3.21
	.05	6.41	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.78	4.74	4.70	4.68	4.64		4.60	4.56
	.01	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.45	10.27	10.15	10.05	9.96	9.89	9.77		9.68	9.55
6	.10	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94		2.90		2.87		2.84
	.05	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.96		3.92	3.87
	.01	13.74	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.79	7.72	7.60		7.52	7.39
7	.10	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70		2.67		2.63		2.59
	.05	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.63	3.60	3.57	3.52		3.49	3.44
	.01	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	7.00	6.84	6.71	6.62	6.54	6.47	6.35		6.27	6.15
8	.10	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54		2.50		2.46		2.42
	.05	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.34	3.31	3.28	3.23		3.20	3.15
	.01	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.19	6.03	5.91	5.82	5.74	5.67	5.56		5.48	5.36
9	.10	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42		2.38		2.34		2.30
	.05	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.13	3.10	3.07	3.02		2.98	2.93
	.01	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.62	5.47	5.35	5.26	5.18	5.11	5.00		4.92	4.80
10	.10	3.28	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32		2.28		2.24		2.20
	.05	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.97	2.94	2.91	2.86		2.82	2.77
	.01	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.21	5.06	4.95	4.85	4.78	4.71	4.60		4.52	4.41
11	.10	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25		2.21		2.17		2.12
	.05	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.86	2.82	2.79	2.74		2.70	2.65
	.01	9.65	7.20	6.22	5.67	5.32	5.07	4.88	4.74	4.63	4.54	4.46	4.40	4.29		4.21	4.10
12	.10	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19		2.15		2.10		2.06
	.05	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.92	2.85	2.80	2.76	2.72	2.69	2.64		2.60	2.54
	.01	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.65	4.50	4.39	4.30	4.22	4.16	4.05		3.98	3.86
13	.10	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14		2.10		2.05		2.01
	.05	4.67	3.80	3.41	3.18	3.02	2.92	2.84	2.77	2.72	2.67	2.63	2.60	2.55		2.51	2.46
	.01	9.07	6.70	5.74	5.20	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	4.02	3.96	3.85		3.78	3.67
14	.10	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10		2.05		2.01		1.96
	.05	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.77	2.70	2.65	2.60	2.56	2.53	2.48		2.44	2.39
	.01	8.86	6.51	5.56	5.03	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.86	3.80	3.70		3.62	3.51
15	.10	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06		2.02		1.97		1.92
	.05	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.70	2.64	2.59	2.55	2.51	2.48	2.43		2.39	2.33
	.01	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.73	3.67	3.56		3.48	3.36
16	.10	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03		1.99		1.94		1.89
	.05	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.45	2.42	2.37		2.33	2.28
	.01	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.61	3.55	3.45		3.37	3.25
17	.10	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00		1.96		1.91		1.86
	.05	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.62	2.55	2.50	2.45	2.41	2.38	2.33		2.29	2.23
	.01	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.52	3.45	3.35		3.27	3.16
18	.10	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98		1.93		1.89		1.84
	.05	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.29		2.25	2.19
	.01	8.28	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.85	3.71	3.60	3.51	3.44	3.37	3.27		3.19	3.07

ANEXO D

TABLAS ESTADISTICAS UTILIZADAS

TABLA, D. 1

COEFICIENTES DE CORRELACION (r) PARA DETERMINADOS GRADOS DE LIBERTAD Y NIVELES DE SIGNIFICANCIA (53)

Grados de libertad	Probabilidad de obtener un valor tan grande o mayor			
	.1	.05	.01	.001
1	.9879	.9969	.9999	1.0000
2	.9000	.9500	.9900	.9990
3	.8054	.8783	.9587	.9912
4	.7293	.8114	.9172	.9741
5	.6694	.7545	.8745	.9507
6	.6215	.7067	.8343	.9249
7	.5822	.6664	.7977	.8982
8	.5494	.6319	.7646	.8721
9	.5214	.6021	.7348	.8471
10	.4973	.5760	.7079	.8233
11	.4762	.5529	.6835	.8010
12	.4575	.5324	.6614	.7800
13	.4409	.5139	.6411	.7603
14	.4259	.4973	.6226	.7420
15	.4124	.4821	.6055	.7246
16	.4000	.4683	.5897	.7084
17	.3887	.4555	.5751	.6932
18	.3783	.4438	.5614	.6787
19	.3687	.4329	.5487	.6652
20	.3598	.4227	.5368	.6524
25	.3233	.3809	.4869	.5974
30	.2960	.3494	.4487	.5541
35	.2746	.3246	.4182	.5189
40	.2573	.3044	.3932	.4896
45	.2428	.2875	.3721	.4648
50	.2306	.2732	.3541	.4433
60	.2108	.2500	.3248	.4078
70	.1954	.2319	.3017	.3799
80	.1829	.2172	.2830	.3568
90	.1726	.2050	.2673	.3375
100	.1638	.1946	.2540	.3211

ma, después de una noche de reposo).

En la tabla F.3 se presenta la distribución de los tiempos requeridos por el sistema para efectuar la limpieza, deaireación y corridas establecidas por día para la producción de 1.06 m³ de agua.

TABLA F.3
DISTRIBUCION DEL TIEMPO DE TRABAJO DEL
SISTEMA PARA PRODUCIR 1.06 m³ DE AGUA

ETAPA	Distribución del tiempo (h)			
	1er Día	2do Día	3er Día	4to. Día
Limpieza *		0.17	0.17	0.17
Deaireación *	0.09	0.09	0.09	0.09
Corridas **	7.28	7.28	7.28	3.64
Total	7.37	7.54	7.54	3.90

* Ver tabla F.1

** Tiempos obtenido al multiplicar las corridas establecidas por día por el tiempo requerido para realizar una corrida (1.83 h /corrida):

$$4 \text{ corridas} \times \frac{1.82 \text{ h}}{\text{Corrida}} = 7.28 \text{ h}$$

$$2 \text{ corridas} \times \frac{1.82 \text{ h}}{\text{Corrida}} = 3.64 \text{ h}$$

A) Cálculo del Costo de Hipoclorito de Calcio

En cada corrida se adiciona 1 gramo de Hipoclorito de calcio; por lo que en la producción de 1.06 m³ de

agua se adicionan 14 gramos de este producto químico.

Considerando que el precio de este producto químico es de ¢17/lb., el costo de los 14 gramos es de:

$$\begin{aligned} \text{Costo del Hipoclorito de Calcio} &= \frac{\text{¢ } 17}{1\text{b}} \times \frac{1\text{ lb}}{459.53\text{ g}} \times 14\text{ gramos} \\ &= \text{¢}0.52 \end{aligned}$$

El costo del Hipoclorito de Calcio por m³ es:

$$\begin{aligned} \text{Costo del hipoclorito de calcio} / \text{m}^3 &= \frac{\text{¢ } 0.52}{1.06\text{ m}^3} \\ &= \text{¢ } 0.49 / \text{m}^3 \end{aligned}$$

B) Cálculo del Costo de Energía Eléctrica

1. Cálculo del Costo de Energía Eléctrica Consumida por el Compresor.

a. Determinación de la energía eléctrica consumida por el compresor

Se asume que la energía eléctrica consumida por el compresor, es la energía que este equipo consume a plena carga, la cual se calcula en base a las especificaciones de este equipo (63).

Energía eléctrica = Voltaje x corriente x factor de potencia consumida

(Ecuación F.1)

$$\begin{aligned} &= 120 \text{ volt} \times 8.5 \text{ A} \times 0.8 \times \frac{1 \text{ kWatt}}{1000 \text{ Watt}} \\ &= 0.82 \text{ kWatt} \end{aligned}$$

Debido a que el compresor es un circuito eléctrico de fuerza, se asume el factor de potencia recomendado para éstos, el cual es de 0.8 (63).

- b. Determinación del tiempo trabajado por el compresor en la producción de 1.06 m^3 de agua.

En el sistema construido, el compresor se utiliza para el suministro de aire (tiempo de aireación por corrida; 30 min), y para proporcionar el tiempo de contacto y agitación en el proceso de cloración (tiempo de contacto por corrida: 20 min.).

En la tabla F.4 se presenta el tiempo trabajado por el compresor en la etapa de aireación y contacto (cloración), según el número de corridas realizadas por día para la producción de 1.06 m^3 de agua.

TABLA F.4
 TIEMPO DE TRABAJO DEL COMPRESOR PARA LA
 PRODUCCION DE 1.06 m³ DE AGUA

DIA	NUMERO DE CORRIDAS	TIEMPO DE AIREACION (h)	TIEMPO DE CONTACTO (h)	TIEMPO TOTAL
1ro	4	2	1.32	3.32
2do	4	2	1.32	3.32
3ro	4	2	1.32	3.32
4to	2	1	0.67	1.67
Tiempo total trabajado por el compresor				11.63

c. Cálculo de la cantidad total de energía eléctrica consumida por el compresor.

$$\begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{total} \\ \text{consumida} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{eléctrica} \\ \text{consumida} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Tiempo de} \\ \text{trabajo} \end{array} \quad (\text{Ecuación F.2})$$

$$= 0.82 \text{ kW} \times 11.63 \text{ h}$$

$$= 9.54 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

d. Cálculo del costo de energía eléctrica consumida.

$$\begin{array}{l} \text{Precio de los kWatt} \\ \text{de energía} \end{array} = 0.37 / \text{kWatt-hr}$$

$$\begin{array}{l} \text{Costo de la} \\ \text{energía} \\ \text{eléctrica} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{Total} \\ \text{Consumida} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Precio} \\ \text{de la} \\ \text{energía} \end{array} \quad (\text{Ecuación F.3})$$

$$= 9.56 \text{ kWh} \times \text{Ø}0.37 \text{ kWh}$$

$$= \text{Ø}3.54$$

2. Cálculo del Costo de Energía Eléctrica Consumida por la Bomba 1.

a. Determinación de la energía consumida por la bomba 1.

Debido a que no se conocen las especificaciones de la bomba 1 (bomba que suministra el agua proveniente del aireador al filtro), el cálculo de la energía eléctrica consumida por ésta, no se basa en la energía que la bomba consume a plena carga, sino que en la energía que este equipo realmente consume en funcionamiento.

La energía que la bomba consume en funcionamiento, se determina con la ayuda de un voltímetro y de un amperímetro. El voltaje y corriente consumidos por la bomba en funcionamiento es 118 volt y 8 amperios respectivamente.

La forma en que se determina el voltaje y corriente consumidos por la bomba se describe en el anexo C.

$$\begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{eléctrica} \\ \text{consumida} \end{array} = 118\text{V} \times 8\text{A} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000\text{W}}$$

(Ecuación F.1)

$$= 0.7552 \text{ kW}$$

- b. Determinación del tiempo trabajado por la bomba 1 en la producción de 1.06 m^3 de agua.

En la tabla F.5 se presenta el tiempo de trabajo de la bomba por día, según las diferentes etapas en que su uso es requerido: deaireación, limpieza y proceso de filtración, este último en función del número de corridas realizadas por día.

TABLA F.5
TIEMPO DE TRABAJO DE LA BOMBA 1 PARA LA
PRODUCCION DE 1.06 m^3 DE AGUA

DIA	TIEMPO DE DEAIREACION (h)	TIEMPO DE LIMPIEZA (h)	TIEMPO DE FILTRACION (h)		TOTAL (h)
			No. DE CORRIDAS	TIEMPO DE FILTRACION TOTAL (h)	
1ro	0.09		4	0.96	1.05
2do	0.09	0.17	4	0.96	1.22
3ro	0.09	0.17	4	0.96	1.22
4to	0.09	0.17	2	0.48	0.74
Tiempo total trabajado por la bomba 1					4.23

- c. Energía eléctrica total consumida por la bomba 1

$$\begin{aligned} \text{Energía} \\ \text{total} \\ \text{consumida} \end{aligned} = 0.7552 \text{ kW} \times 4.23 \text{ h} \quad (\text{Ecuación F.2})$$

$$= 3.2 \text{ kWh}$$

- d. Costo de la energía eléctrica consumida por la bomba 1.

$$\begin{array}{l} \text{Costo de la} \\ \text{energía} \\ \text{eléctrica} \end{array} = 3.2 \text{ kWh} \times \text{¢}0.37/\text{kWh}$$

(Ecuación F.3)

$$= \text{¢}1.18$$

3. Cálculo del costo de la energía eléctrica consumida por la bomba 2.

- a. Determinación de la energía eléctrica consumida por la bomba 2.

De igual manera que para el compresor, se asume que la energía eléctrica consumida por la bomba 2 (bomba utilizada para mantener constante el nivel de agua en el aireador) es la que consume este equipo a plena carga.

$$\begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{eléctrica} \\ \text{consumida} \end{array} = 115 \text{ V} \times 0.85 \text{ A} \times 0.8 \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

(Ecuación F.1)

$$= 0.0782 \text{ kW}$$

- b. Determinación del tiempo trabajado por la bomba 2 para producir 1.06 m³ de agua.

El tiempo trabajado por la bomba 2, es el mismo que el tiempo de filtración de la bomba 1,

el cual es de 3.4 h (ver tabla F.5).

- c. Energía eléctrica total consumida por la bomba 2.

$$\text{Energía total consumida} = 0.0782 \text{ kW} \times 3.4 \text{ h} \quad (\text{Ecuación F.2})$$

$$= 0.27 \text{ kWh}$$

- d. Costo de la energía eléctrica consumida por la bomba 2.

$$\begin{aligned} \text{Costo de la} \\ \text{energía} &= 0.27 \text{ kWh} \times \text{¢}0.37/\text{kWh} \\ \text{eléctrica} & \end{aligned} \quad (\text{Ecuación F.3})$$

$$= \text{¢}0.099$$

ANEXO G

Pruebas experimentales realizadas a la piedra volcánica:

- 1) El espacio intersticial libre, disponible entre los poros del lecho filtrante de tamaño efectivo, 0.6 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4.
- 2) El regenerante más conveniente.

1. Determinación del espacio intersticial libre, disponible entre los poros del lecho filtrante de tamaño efectivo, 0.6 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4.

Material:

1. Probeta de 25 ml
2. Balanza granataria
3. Pipeta de 5 ml

Procedimiento:

- a. Pesar una probeta limpia de 25 ml.
- b. Colocar en la probeta una determinada cantidad de lava volcánica húmeda de tamaño efectivo 0.6 mm y coeficiente de uniformidad de 1.4.
- c. Pesar la probeta con la piedra volcánica húmeda.
- d. Compactar suavemente la lava volcánica y medir el volumen que ésta ocupa en la probeta que la contiene.

e. Adicionar agua, con una pipeta graduada, hasta cubrir la lava volcánica sin desplazarla.

Nota: Se considera que el volumen de agua que cubre la piedra volcánica sin desplazarla, es representativo del volumen que ocupan los espacios vacíos disponibles, para ser llenados por los óxidos responsables del efecto autocatalítico esperado

- f. Calcula la densidad de la piedra volcánica húmeda.
- g. Calcular el espacio libre disponible, para la retención de óxidos, en la altura de lecho filtrante de 0.8 m.
- h. Calcular la disponibilidad de retención de óxidos de la piedra volcánica.

Resultados obtenidos:

Peso de la probeta = 232.5 g

Peso de probeta + lava = 244.26 g

Volumen de lava húmeda = 7 ml (7 cm³)

Volumen de agua que
llena los espacios
vacíos = 3 ml (3 cm³)

Cálculos:

a. Cálculo de la densidad de la piedra volcánica húmeda:

Peso de lava = (peso de probeta + lava) - Peso de probeta
limpia

$$= (244.26 - 232.5) \text{ g}$$

$$= 11.76 \text{ g}$$

$$\text{Densidad} = \frac{11.76 \text{ g}}{7 \text{ cm}^3} \quad (\text{Ecuación E.3})$$

$$= 1.68 \text{ g/cm}^3$$

- b. Cálculo del espacio disponible para la retención de óxido en la altura de lecho filtrante (lava de TE = 0.6 mm y CU = 1.4), de 0.8 m

$$\text{Volumen de espacios libres disponibles} = \text{Volumen de agua que llena los espacios vacíos (poros) de lava}$$

$$= 3 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de lecho filtrante de 0.8 m de altura} = 0.01459 \text{ m}^3 \text{ (1459 cm}^3\text{)}$$

$$\text{Espacio disponible en lecho filtrante de 0.8 m} = \frac{3 \text{ cm}^3 \text{ de espacios libres}}{7 \text{ cm}^3 \text{ de lava húmeda}} \times 1459 \text{ cm}^3 \text{ de lava}$$

$$= 625.29 \text{ cm}^3$$

- c. Cálculo de la disponibilidad de retención de óxidos de la piedra volcánica.

$$\text{Disponibilidad de retención} = \frac{\text{Espacio disponible en lecho filtrante}}{\text{Volumen de lecho filtrante}} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{Disponibilidad de retención} &= \frac{625.29 \text{ cm}^3 \text{ de espacios libres}}{1459 \text{ cm}^3 \text{ de lava}} \times 100 \\ &= 42.85\% \\ &= 43\% \end{aligned}$$

2. Determinación del regenerante más conveniente.

Material y equipo:

1. Erlenmeyer de 250 ml
2. Probeta de 100 ml
3. Hot plate
4. Microscopio

Soluciones:

1. Agua
2. Acido clorhídrico (HCl) al 4%
3. Hidrosulfito de sodio al 4%
4. Combinación de agua, HCl al 4% e hidrosulfito de sodio al 4%

Procedimiento:

- a. Pesar 5 gramos de lava volcánica utilizada en la etapa experimental.
- b. Colocar la lava en un erlenmeyer de 250 ml.
- c. Agregar 60 ml de la solución particular en cada caso (agua, HCl al 4% o ditionito de sodio al 4%).

- d. Dar un tiempo de contacto de 30 minutos en cada caso con agitación constante, a temperatura ambiente.
- e. Una vez finalizado el tiempo de contacto, tomar una pequeña muestra de lava volcánica y observarla al microscopio.