

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA



“ELABORACIÓN DE UN FILTRO DE APLICACIÓN DOMESTICA PARA LA
REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO DEL AGUA, UTILIZANDO EL PROCESO
DE AERIACION Y CONTACTO.”

TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO POR:

WALTER ENRIQUE RIVERA RAMÍREZ

CARLOS ALEXANDER VALIENTE MURGAS

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADO EN QUÍMICA Y FARMACIA

Febrero de 2003

SAN SALVADOR, EL SALVADOR CENTROAMÉRICA



© 2001, DERECHOS RESERVADOS

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento,
sin la autorización escrita de la Universidad de El Salvador

SISTEMA BIBLIOTECARIO, UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA

DRA. MARIA ISABEL RODRÍGUEZ

SECRETARIA

LIDIA MARGARITA MUÑOS VELA

FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA

DECANA

LICDA. MARIA ISABEL RAMOS DE RODAS

SECRETARIA

LICDA. ANA ARELY CACERES MAGAÑA.

AGRADECIMIENTOS.

A los miembros del jurado por su tiempo invertido, a nuestros asesores por habernos guiado a resolver las problemáticas que se enfrentaron durante la investigación.

Al licenciado Ricardo Rodríguez, jefe del departamento de la administración Nacional de Acueductos y alcantarillados por habernos facilitado información.

Al Ingeniero José Miguel Landaverde, jefe del laboratorio de suelos de la facultad de las ingenierías de la universidad de El Salvador, por habernos proporcionado materiales importantes para la construcción del filtro.

A la ingeniero Cecilia de Flamenco, jefe del laboratorio de Química por su colaboración en cuanto al préstamo de materiales.

Al Licenciado Arturo García, jefe de almacenes y bodega de la facultad de química y Farmacia, por toda su ayuda brindada.

Al personal administrativo y compañeros que de alguna manera nos ayudaron durante el trabajo realizado.

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso ya que sin su ayuda y compañía, este gran logro no se hubiera concretado.

A mis padres Carlos Roberto Valiente y Marta Pérez por todo su apoyo durante la carrera.

A mi esposa Violeta por su comprensión y apoyo incondicional.

A todos mis amigos y compañeros.

A mis padres Cruz y Lucia y a mis hermanos Edwin, Víctor, Guillermo, y Nubia, por todo el apoyo que me brindaron durante la carrera.

A mis amigos y a las personas que siempre han creído en mí.

ASESORES

DRA. GLORIA RUTH CALDERÓN.

ING. SERGIO ARMANDO MARAVILLA MIRANDA.

JURADO.

LIC. LORENA MARGARITA RAMÍREZ MERCADO.

LIC. KATIA EUNISE LEYTON BARRIENTOS.

LIC. RAMÓN ALBERTO MURCIA SAAVEDRA.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

	Pág.
1. Problemática que ocasiona la presencia de hierro y manganeso en el agua.	3
2. Presencia de Hierro y Manganeso en los mantos de agua.	5
2.1. Acción Disolvente del agua.	6
3. Presencia del Hierro y Manganeso en el suelo.	7
3.1. Procesos de acuerdo al cual algunas sustancias llegan al suelo y luego al agua.	8
3.1.1. La Traslocación.	8
3.1.2. Oxidación/Reducción.	9
3.1.2.1. Hidromorfia.	9
3.2. Condiciones necesarias para que se Produzca la oxidación/reducción.	10
3.2.1. Saturación en agua.	10
3.2.2. Ausencia de Oxigeno Disuelto.	10
3.2.3. Presencia de Materia Orgánica Disuelta.	11

3.2.4. Temperatura.	11
3.2.5. pH. (Relación Eh/pH).	11
4. Características Específicas de los Elementos que ocasionan el problema.	19
4.1. Hierro.	19
4.2. Manganeseo.	20
5. Efectos de la presencia de hierro y manganeseo en la salud.	22
5.1. Hierro.	22
5.2. Manganeseo.	23
6. Remoción del hierro.	24
7. Remoción de manganeseo.	26
8. Metodologías para la remoción de hierro y manganeseo.	26
8.1. Método de Contacto.	27
8.2. Método de Aereación.	29
8.2.1. Mecanismo de aereación.	31
8.2.1.1. Principios de transferencia de gas.	32
8.2.1.2. Equipo utilizado en el método por aereación.	33
8.3. Método de oxidación por aereación y sedimentación.	35
8.4. Método de resinas de intercambio Iónico.	37
9. Generalidades de los sistemas Filtrantes.	39
9.1. Filtración por gravedad (filtración lenta).	40

9.2. Filtración a presión.	41
9.3. Filtración en medio granular.	42
9.4. Filtración a través de lechos múltiples.	45
10. Materiales de los sistemas filtrantes.	48
10.1. Arena.	49
10.2. Grava.	50
10.3. Rocas Ígneas. (Lava).	51
10.4. Pirolusita.	52
CAPITULO II.	
PARTE EXPERIMENTAL.	54
2. Planificación de la Investigación. (Investigación Bibliografica).	55
2.1. Investigación de campo.	56
2.2. Selección de los Materiales.	57
2.3. Preparación de los materiales.	61
2.4. Análisis Granulométrico convencional.	64
2.5. Análisis granulométrico estadístico.	66
2.6. Elaboración del filtro.	71
2.7. Determinación del tiempo de aereación.	77
3. Determinación de la eficiencia del filtro.	80

3.1. Análisis de Manganeso por el Método del Persulfato.	81
3.2. Análisis de Hierro Total por el Método de la Fenantrolina.	84
3.3. Determinación de Temperatura.	90
3.4. Determinación de Potencial de Hidrógeno.	90
3.5. Determinación del Sabor Y Olor.	91
3.6. Procedimiento para determinación de Olor.	92
3.7. Turbidez.	94
3.8. Residuo Total.	95
4. Calculo del Flujo de la Corriente de Agua.	96
5. Elección de la Solución de Lavado.	99
6. Determinación del Tiempo de Vida Útil del filtro Elaborado.	101
7. Análisis de las Muestras.	103
CAPITULO III	
ANÁLISIS DE RESULTADOS.	108
3. Comparación de Eficiencias de los diferentes filtros respecto a la remoción de Hierro y Manganeso según su estabilidad física.	109
4. Costos del Filtro.	112
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES.	
GLOSARIO.	

BIBLIOGRAFÍA.

ANEXOS.

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla No. 1. Procesos de aireación en el tratamiento de agua.	31
Tabla No. 2. Composición química de la lava Salvadoreña.	52
Tabla No. 3. Municipios y sitios de muestreo.	58
Tabla No. 4. Tamaños de partículas de cada material utilizado.	64
Tabla No. 5. Análisis granulométrico convencional.	65
Tabla No. 6. Análisis granulométrico estadístico.	66
Tabla No. 7. Concentración de hierro ferroso respecto al tiempo de aireación.	78
Tabla No. 8. Tiempos de aireación, para diferentes concentraciones de hierro.	80
Tabla No. 9. Preparación de curva estándar para manganeso.	84
Tabla No.10. Preparación de curva estándar para hierro.	87
Tabla No. 11. Concentración Vrs. Absorbancia para manganeso.	87

Tabla No. 12. Concentración Vrs. Absorbancia para hierro.	88
Tabla No. 13.A. Tiempo de salida de 1 litro de agua a distintas alturas del tanque aireador (‘min ‘seg).	97
Tabla No. 13.B. Tiempo de salida de 1 litro de agua a distintas alturas del tanque aireador (‘min ‘seg).	98
Tabla No. 14. Ventajas y desventajas de las diferentes soluciones de lavado.	99
Tabla No. 15. Resultados colonia El Limón.	104
Tabla No. 16. Resultados Colonia Prados de Venecia.	105
Tabla No. 17. Resultados colonia San Felipe.	106
Tabla No. 18. Resultados colonia Santa Carlota.	107
Tabla No. 19. Costo del filtro.	112

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. No.1. Niveles de Eh y pH a los cuales se produce la Oxido/Reducción.	13
Fig. No.2. Regiones de estabilidad de las formas de el hierro en función del Eh y pH. . . .	14
Fig. No.3. Regiones de estabilidad de las formas del manganeso en función del Eh y pH.	15
Fig. No.4. Superposición de los campos del Hierro y el Manganeso.	16
Fig. No.5. Tipos de Suelos.	17
Fig. No.6. Variaciones de los valores de Eh de un suelo sometido a dos cambios de humedad diferente.	18
Fig. No. 7. Diseño de un Aireador de aire Difundido.	33
Fig. No. 8. Tamices U.S. Estándar.	63
Fig. No.9. Agitador mecánico ROTAP.	63
Fig. No.10. Filtro con tanque experimental.	72
Fig. No.11. Esquema del diseño final del filtro con tanque aireador.	72
Fig. no.12. Distribución de materiales del lecho filtrante en el filtro N° 1.	73
Fig. No.13. Distribuciones de materiales en el segundo filtro.	74

Fig. No.14. Distribuciones de materiales en el tercer filtro.	74
Fig. No.15 Esquema del cuarto filtro.	75
Fig. No.16. Diseño final del filtro.	76
Fig. No.17. Generador de agua Inodora.	92
Fig. No.18. Esquema del aereador.	97

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafico No. 1. Oxidación de Fe^{+2} a Fe^{+3} por aireación.	78
Grafico No. 2. Extrapolación de la grafica anterior.	79
Grafico No. 3. Curva de calibración para manganeso.	88
Grafico No. 4. Curva de calibración para Hierro.	89
Grafico No. 5. Porcentaje de Remoción del Hierro y Manganeso para los diferentes filtros elaborados.	109

ÍNDICE DE ANEXOS

	No.Pag
Gráficos de Pourdaix.	1
Distribución de materiales en la corteza terrestre.	2
Grafica de límites de filtración.	3
Norma salvadoreña de Calidad Fisicoquímica del agua.	4
Análisis de ANDA.	5
Grafico de análisis estadístico para calculo diámetro geométrico.	6
Ejemplos de cálculos.	7
Calculo del residuo total.	8
Ejemplos para las diluciones de estándares.	9
Ejemplo de preparación de estándar para determinar porcentaje de remoción.	10
Ejemplo del cálculo de vida útil para el filtro con concentración de manganeso conocida.	11

INTRODUCCIÓN

La presente investigación, surgió como consecuencia de la elevada presencia de hierro y manganeso en las aguas de pozos de algunas de las comunidades de los municipios de Soyapango, Ilopango y San Jacinto en el departamento de San Salvador.

Para resolver el problema, se diseñó un filtro el cual removería los minerales en cuestión, por lo que se ensayaron varios tipos de filtros los cuales a medida que avanzaba la investigación se irían perfeccionando a través de los datos obtenidos para mejorarlo y así obtener un resultado óptimo.

El diseño final de dicho filtro se hizo de acuerdo a la experiencia tomada de la investigación, y con el cual se obtuvieron los mejores resultados en la remoción del hierro y manganeso.

El esfuerzo ha sido orientado a proporcionar una alternativa de tratamiento de aquellas aguas de pozo que requieran la eliminación de ambos minerales para asegurar así la calidad de ésta.

En el primer capítulo se introducen los temas relacionados; tanto al problema que causan la presencia de hierro y manganeso como a la forma en la cual éstos se trasladan a las aguas

naturales. Además se incluyen las bases técnicas para la fabricación de filtros tanto mecánicas, químicas y físicas.

En el segundo capítulo, se incluye la metodología de la investigación, selección y preparación de los materiales a utilizar, toma de muestras y determinación de la eficiencia del filtro y tiempo de vida útil como los resultados de los análisis realizados a las muestras..

En el tercer capítulo, se presentan datos comparativos obtenidos de las muestras y el análisis de estos resultados.

Los resultados en los análisis previos obtenidos se compararon con las guías dadas por la Norma Salvadoreña Obligatoria N.S.O. para agua potable. (Por sus siglas en español). Finalmente aparecen conclusiones y recomendaciones, y los anexos que ayudarán a una mejor comprensión de esta investigación.

OBJETIVOS

1. OBJETIVO GENERAL:

1. Elaborar un filtro de aplicación doméstica para la remoción de Hierro y Manganeseo del agua, utilizando el proceso de Aeriación y contacto.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- 2.1 Comprobar la eficacia del filtro y un rango apropiado de caudal de trabajo, tomando en cuenta los parámetros fisicoquímicos.
- 2.2. Verificar la cantidad de agua que el filtro puede tratar.
- 2.3. Establecer la relación costo-beneficio del filtro elaborado.
- 2.4. Evaluar parámetros físicos; y sensoriales tales como: pH, turbidez, color, olor, sabor, temperatura, residuo total, concentración de hierro y manganeso en las fuentes de abastecimiento.

2.5. Cuantificar la concentración de hierro y manganeso presentes en el agua, antes y después de haber sido tratada con el filtro elaborado.

1. Problemática que ocasiona la presencia de Hierro y Manganeso en el agua.

La presencia de hierro y manganeso en los depósitos de agua para abastecimientos públicos provoca serios problemas, el hierro puede aparecer en el agua de abastecimientos como un producto de la corrosión, en la cual se encuentra como un ión o como una molécula; sin embargo ambas especies pueden estar como contaminantes del agua. Estos ocasionan problemas en las tuberías debido al crecimiento de bacterias que se alimentan de la oxidación del hierro y que al morir provocan olores y sabores desagradables, ejemplos de este tipo de bacterias son: *Thiobacillus ferrooxidans*.

Además de esto el hierro y el manganeso suscitan problemas en la industria afectando los tintes para telas, los colores en el papel, manchando los enseres utilizados y otros procesos de manufactura.

Las aguas que contienen hierro y manganeso y que se exponen al aire se tornan turbias lo que desencadena en el agua una apariencia inaceptable para la ingestión de la misma; la turbidez se debe a la oxidación del Fe^{+2} a Fe^{+3} que es la transformación de hierro ferroso en hierro férrico que es un coloide de color naranja cuando no ha precipitado. El manganeso produce un precipitado negro en el fondo de los recipientes que contienen el agua (1).

El hierro y el manganeso se precipitan como hidróxidos los cuales se depositan sobre casi cualquier superficie; así, éstos pueden manchar los aparatos de lavandería y artefactos de porcelana. También la presencia de 0.1 mg/L de sulfato ferroso y 0.2 mg/L de cloruro de hierro originan sabor en el agua que los contienen. (12)

Estos dos minerales también ocasionan diversos problemas en el agua, dependiendo del uso al cual se destine; así por ejemplo, el agua para animales no los debe contener debido a que el sabor y el olor que originan afecta al gusto de los animales provocando la baja ingesta del agua y afectándoles la salud; la presencia de hidróxidos tanto del hierro como los óxidos de manganeso pueden provocar la muerte de peces, debido a que a concentraciones mayores de 0.5 mg/L, vuelven al agua alcalina hasta un punto tóxico para la fauna acuática. El manganeso

puede ser tóxico en concentraciones de 0.5 a 6.0 gramos de Mn, ésto fue probado en conejos, los cuales se desarrollaron pasmosamente e interfirió en su desarrollo óseo. Las sales de manganeso dan un sabor metálico al agua en concentraciones arriba de los 0.5 mg/L (12).

2. Presencia de Hierro y Manganeso en los Mantos de Agua.

Los depósitos subterráneos constituyen una fuente principal de agua dulce. En función de la capacidad de almacenamiento, las capas acuíferas subterráneas mundiales contienen más del 90% del agua fresca total con que se cuenta para uso humano. Mucha de esta agua se encuentra demasiado profunda para ser explotada en forma económica. En Estados Unidos, donde los Grandes Lagos contienen un gran volumen de agua dulce, la proporción entre el agua superficial y el agua subterránea es más alta; pero aún ahí, se ha calculado que al menos el 50% de los recursos totales de agua dulce está en mantos acuíferos subterráneos.

Al filtrarse el agua a través del suelo, los organismos presentes en la tierra consumen el oxígeno disuelto y producen dióxido de carbono, uno de los principales agentes corrosivos en la disolución de minerales de las estructuras geológicas. Es común encontrar hierro y

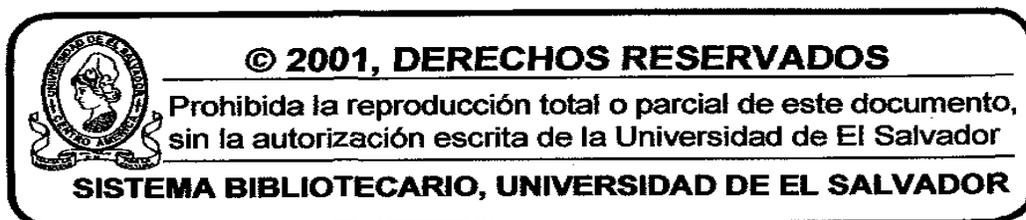
manganeso en las aguas que carecen de oxígeno si éstas han estado en contacto con minerales que contienen hierro.

Es poco usual encontrar niveles elevados de hierro disuelto en las aguas superficiales, excepto cuando la fuente de agua tiene un fuerte color (naranja) y un pH relativamente bajo. En este caso, el hierro está generalmente formando un complejo con la materia orgánica y produce el color. Una excepción de esto es en el caso de que haya un desagüe ácido de una mina hacia la corriente; en esta circunstancia el hierro se introduce en el agua en la forma reducida (Ferrosa) y una falta de oxígeno disuelto evita su oxidación hasta el estado férrico menos soluble. (1)

2.1. Acción Disolvente del Agua

La acción disolvente del agua varía de un mineral a otro, como también en la disolución de los gases.

Como los minerales, los gases y la materia orgánica son solubles en agua. La Ley de Henry establece que la cantidad de gas disuelto en agua es directamente proporcional a la presión del gas sobre la superficie del agua. En cualquier sistema gaseoso el porcentaje de presión es igual al porcentaje de volumen y son iguales al porcentaje en mol.



$$(P_g/P_t) = (V_g/V_t) = (M_g/M_t)$$

La atmósfera contiene aproximadamente 20% de oxígeno y 80% de nitrógeno. Entonces, a la presión atmosférica de 760 mm de mercurio.

La presión parcial de oxígeno es 152 mm de mercurio y la presión parcial del nitrógeno es 608 mm de mercurio. A estas presiones parciales, y temperatura ambiente (25 °C) la concentración aproximada de oxígeno en el agua es 10 mg/L y la de nitrógeno es de 15 mg/L.

Aún cuando cuatro veces más moléculas de nitrógeno que de oxígeno están bombardeando el agua, menos del doble entran en la solución. Si la presión total del gas en la superficie del agua se duplicase, también lo harían las concentraciones de oxígeno y nitrógeno en la solución acuosa. A diferencia de la mayor parte de sales minerales, que se vuelven más solubles a temperaturas más elevadas, la solubilidad de los gases disminuye cuando la temperatura aumenta. De aquí la importancia del paso del oxígeno al agua, ya que éste tiene mucho que ver en los estados de los minerales disueltos en esta última y en su acción disolvente como en la distribución.

La distribución varía de acuerdo a los diferentes tipos de suelos y condiciones atmosféricas como la lluvia, temperatura, etc. (1) (ver anexo # 2)

3. Presencia del Hierro y Manganese en el Suelo.

La presencia de estos minerales esta determinada por diferentes factores, los cuales determinan tanto concentraciones como la forma en la que se encuentran. Estos se depositan a

través de distintos procesos los cuales están marcados tanto por las características de los suelos como de las regiones donde se encuentran.

3.1. Procesos de acuerdo al cual algunas sustancias llegan al suelo y luego al agua.

Si se consideran aquellos procesos en los que el desplazamiento de sustancias tiene efecto primordial en la formación del suelo, se pueden mencionar primordialmente dos:

3.1. 1. La Traslocación.

Esta se realiza por la acción del agua que se desplaza a través del suelo, en este desplazamiento el movimiento es vertical descendente. El agua que se desplaza por el suelo, arrastra diversos materiales, preferentemente los más móviles. En este tipo de movimientos se distinguen dos fases: una inicial de movilización, que se refiere al transporte y pérdida de materiales, y que se le llama Eluviación; y un segundo proceso que representa la inmovilización y acumulación de materiales, ya sea de ganancia o enriquecimiento de

sustancias que es llamada Iluviación. Las sustancias que se pueden eluviar lo hacen básicamente bajo tres formas distintas: a) como iones disueltos (lixiviación), b) en forma pseudo soluble formando complejos órgano metálico (queluviación), y c) en suspensión (Iluviación de arcilla). Siendo éstos, los procesos por medio de los cuales el hierro y manganeso se encuentran presentes en el suelo y luego en el agua. (14)

3.1.2. Oxidación/Reducción.

Se referirá en este proceso exclusivamente a las consecuencias que la oxidación/ reducción del Fe y del Mn producen en el suelo. Antes de pasar al agua tanto hierro como manganeso tienen que sufrir procesos de oxidación/reducción, tales fenómenos suceden de acuerdo a las siguientes características que se presentan en los suelos:

3.1.2.1. Hidromorfia

Se conoce por Hidromorfia a un estado permanente o temporal de saturación de agua en el suelo que va asociada a la existencia de condiciones reductoras u oxidantes.

Las acciones de la Hidromorfia tienen importantes efectos en el suelo que se reflejan tanto en los constituyentes, como en las propiedades del agua que los arrastra. Esta importancia ha sido

ampliamente reconocida y de ahí la existencia de numerosos términos que hacen alusión a éste estado en todos los sistemas de descripción y clasificación de suelos. (14)

3.2. Condiciones Necesarias para que se Produzca la oxidación/reducción.

3.2.1. Saturación en agua.

El requisito indispensable para que se desarrolle el proceso de reducción es la existencia de un exceso de agua en el suelo durante un determinado tiempo.

El aporte de agua puede proceder de un nivel freático suficientemente superficial que puede ser de origen pluvial o nival. Esto ocurre preferentemente en los suelos con un cambio de texturas brusco entre sus horizontes, como es el caso de los Luvisoles.

3.2.2. Ausencia de Oxígeno Disuelto.

Esta condición se cumple fácilmente en el suelo siempre que el agua permanezca estancada en él y no se renueve. Este es el caso, por ejemplo, de los suelos arcillosos, con mal drenaje interno. De esta forma los microorganismos consumirán rápidamente todo el oxígeno que estaba disuelto en el agua. A veces el suelo se encuentra sometido a frecuentes aportes de agua superficiales de escorrentía o fluviales que circulan a través de él y, al permanecer muy

oxigenado no se producen reducciones a pesar de la intensa humedad edáfica. Esta situación es muy típica de los fluvisoles. (14)

3.2.3. Presencia de Materia Orgánica Disuelta.

El agua al desplazarse lentamente a través del suelo se va cargando de residuos orgánicos y adquiere una fuerte reacción reductora. Los suelos muy pobres en materia orgánica no presentan, en general, rasgos hidromórficos que se encuentran saturados de agua durante un tiempo apreciable.

3.2.4. Temperatura.

La temperatura debe ser lo suficientemente alta como para no limitar la actividad biológica.

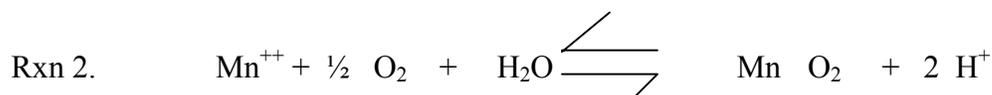
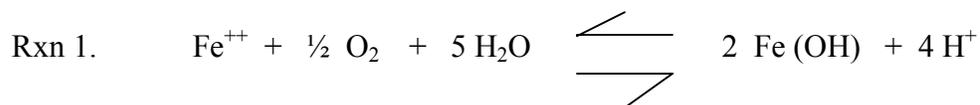
Debido a que las reacciones de oxidación – reducción se desarrollan a una velocidad muy lenta. En la práctica es necesaria la acción de los microorganismos que actúan como catalizadores, es por ello que la temperatura deberá ser superior a los 5°C y menor a los 50 °C durante la fase de Hidromorfia ya que éste es el límite usualmente aceptado para el desarrollo de la actividad microbiana.(14)

3.2.5. pH. (Relación Eh/ pH).

Como la reducción del Fe y del Mn es un proceso fundamentalmente bioquímico el pH ha de ser un factor limitante de la actividad microbiana; por lo que en un ambiente bioquímico necesariamente el pH deberá ser ácido, a estos valores de pH entre 1 y 5 los microorganismos oxidativos trabajan efectivamente siendo uno de éstos el thiobacillus ferrooxidans.

El comportamiento de los materiales edáficos afectados por los proceso de reducción/oxidación puede reflejarse en diagramas (conocidos como diagramas de Pourbaix ver anexo # 1) en los que en base a los valores de Eh y pH (donde el Eh depende del pH) se delimitan los respectivos campos de estabilidad.

Los ambientes aireados son oxidantes y les corresponden altos valores de Eh, mientras que los ambientes saturados en agua suelen ser medios reductores y se definen por bajos valores de Eh. (Ver figura 1)Ejemplos de reacciones:



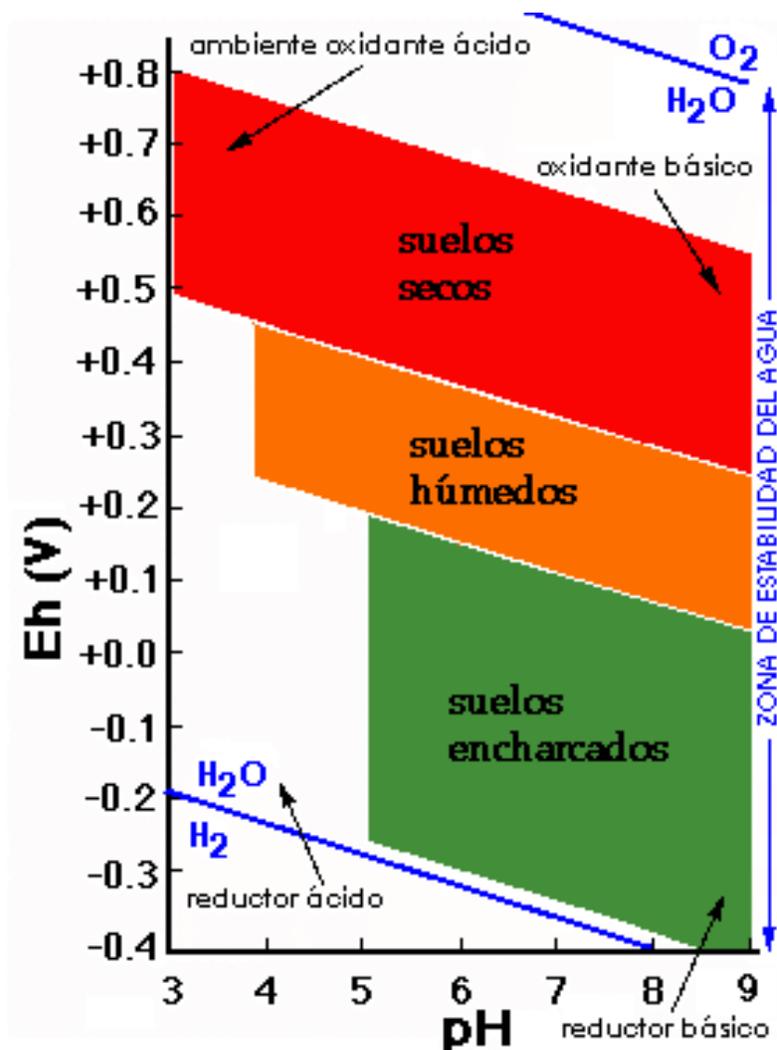


Fig. No. 1

NIVELES DE Eh Y pH A LOS CUALES SE PRODUCE LA OXIDO/REDUCCIÓN

El comportamiento de las formas de hierro y del manganeso se encuentra fuertemente influenciadas por las condiciones redox y de Acidez/alcalinidad que existen en el suelo.

En la figura 2 se muestran las regiones de estabilidad de las formas del hierro en función del Eh/pH. La región del hierro precipitado es mucho más grande que la forma soluble.(14)

El hierro soluble está en forma reducida como Fe^{++} y corresponde a la región de menor pH preferentemente con Eh bajos.

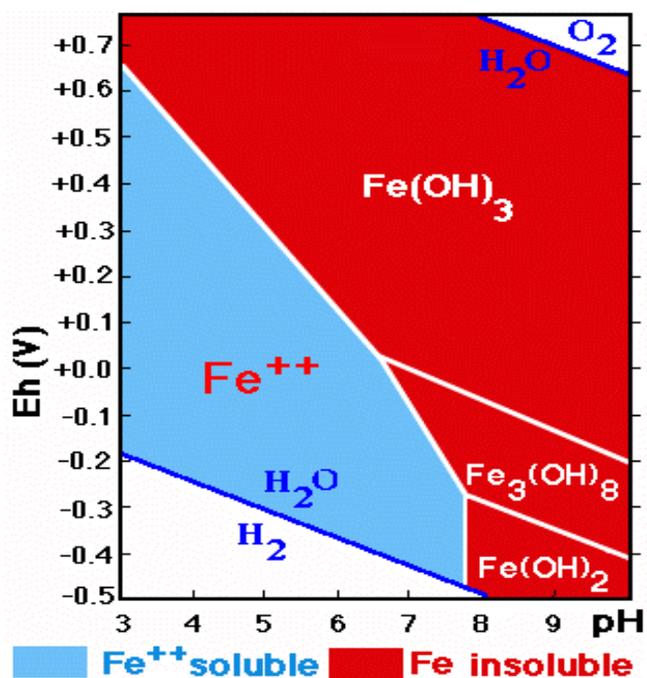


Fig. No. 2

REGIONES DE ESTABILIDAD DE LAS FORMAS DEL HIERRO EN FUNCIÓN DEL Eh/pH.

En la figura 3 se muestran las regiones de estabilidad de las formas del Mn en función del Eh/pH. La región del Mn soluble es mucho más grande que la de las formas precipitadas (al igual de lo que ocurre para el Fe)

El manganeso soluble está, como en el caso del hierro, en su forma reducida Mn^{++} . Y corresponde a la región de pH de 9 y cubre una amplia gama de Eh, aunque, como es lógico preferentemente en la zona de valores bajos.

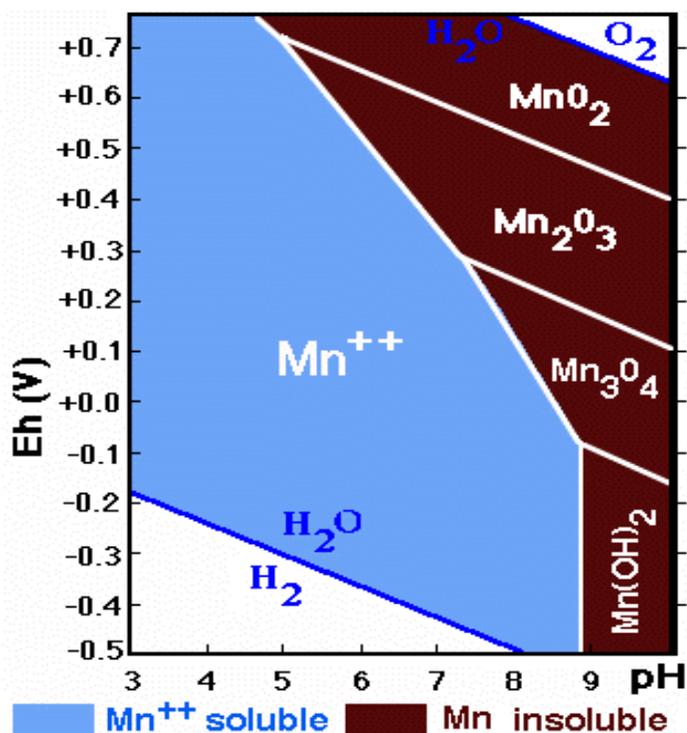


Fig. No. 3

**REGIONES DE ESTABILIDAD DE LAS FORMAS DEL MANGANESO EN
FUNCIÓN DEL Eh/pH.**

Si superponemos los campos de estabilidad del Fe y del Mn se delimitan tres regiones.
(Ver Figura. 4). Hierro y manganeso soluble, hierro insoluble y manganeso soluble, hierro y manganeso insoluble.

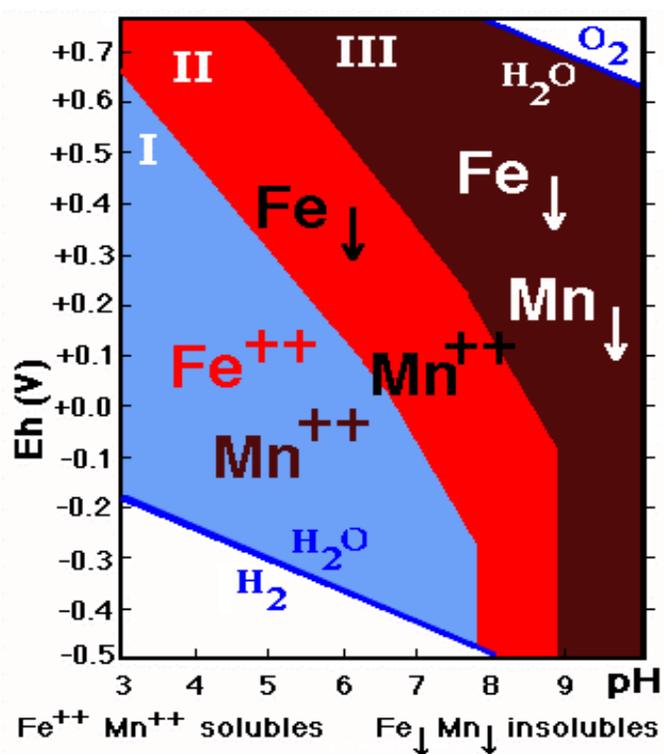


Fig. No. 4

SUPERPOSICIÓN DE LOS CAMPOS DE ESTABILIDAD DEL HIERRO Y MANGANESO

Si superponemos los campos de estabilidad del Fe y del Mn de la figura anterior a las regiones correspondientes a los suelos secos (D), húmedos (W) y encharcados (F), podemos destacar una serie de hechos de interés. (ver figura 5)(14)

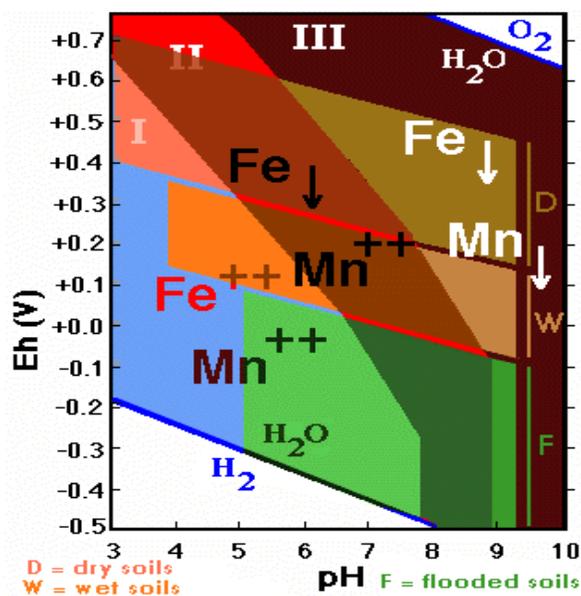


Fig. No. 5
TIPOS DE SUELOS

Suelos secos: Debido a la característica de ausencia total de agua

-El Fe prácticamente siempre se encuentra insoluble (solo soluble en suelos extremadamente ácidos y con muy altos valores de Eh.

-El Mn es muy influenciado por el pH. Es soluble en suelos ácidos e insolubles en los alcalinos.

Suelos encharcados: La gran cantidad de humedad presente en este tipo de suelo da lugar a:

- El Fe se encuentra en fases solubles, en los suelos ácidos e insolubles en los alcalinos.

- El Mn prácticamente siempre se encuentra en fase soluble.

Es de interés destacar el hecho de que el manganeso se reduce siempre a valores más altos de Eh que el hierro, por lo que al humedecerse el suelo será el primero en movilizarse y al producirse la desecación se oxidará (y por tanto se inmovilizará) en último lugar. Es pues el más móvil, como se pone en manifiesto en la figura # 6, en la que se han representado las posibles variaciones de los valores de Eh de un suelo sometido a dos cambios de humedad diferentes, uno de corta Hidromorfia (línea celeste) y otro con una Hidromorfia mucho más intensa (línea amarilla).

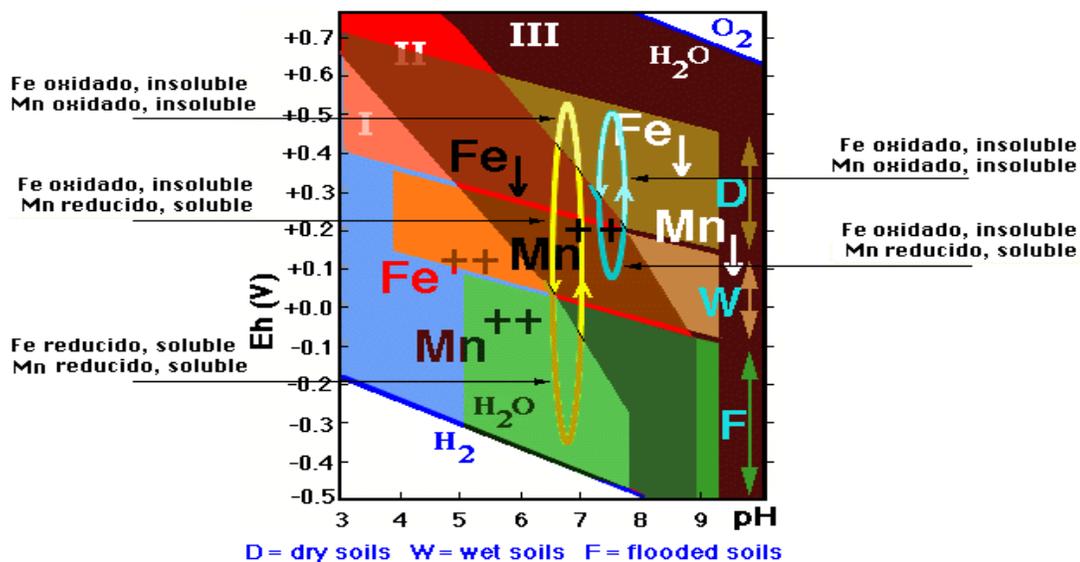


Fig. # 6

**VARIACIONES DE LOS VALORES DE Eh DE UN SUELO SOMETIDO A DOS
CAMBIOS DE HUMEDAD DIFERENTE**

-En el primer caso, la bajada del Eh es poco acentuada y solo llega a afectar al Mn que se reduce, se moviliza y, si no es lavado fuera del perfil, al desecarse se acumula formando nódulos y películas.

-En el segundo caso la disminución del Eh es lo suficientemente marcada como para afectar también al hierro.

En condiciones normales, la saturación en agua equivale a reducción, el manganeso y hierro se encuentran solubles como Fe^{++} y Mn^{++} , se redistribuyen por el perfil formando compuestos reducidos (de colores grisáceos más o menos azulados y verdosos) o son eliminados del suelo (se producen decoloraciones), quedando en definitiva los horizontes más o menos grisáceos.

Por lo contrario, en condiciones de aridez prevalece el ambiente oxidante, el Fe y el Mn se encuentran oxidados, y por tanto inmóviles, acumulándose en el suelo bajo la forma de compuestos de colores intensos, negros, rojos, pardos o amarillos. (14y 15)

4.0. Características Específicas de los Elementos que Ocasianan el Problema.

4.1. Hierro.

(Fe^{+2} y Fe^{+3} : PESO ATÓMICO 55.9: GRUPO VIII,) ELEMENTO DE TRANSICIÓN.

El hierro se encuentra en la mayor parte de las rocas ígneas y en los minerales arcillosos. En ausencia de oxígeno, el hierro en estado reducido es bastante soluble. Cuando se oxida en un rango de pH de 7.0 - 8.5, el hierro es casi completamente insoluble, y su concentración se puede reducir con facilidad a menos de 0.3 mg/L, el máximo fijado por los estándares para agua potable. Debido a que el hierro es un producto de la corrosión en los sistemas de las tuberías de acero, con frecuencia es el que se encuentra en el agua en un sistema de distribución se debe a esto su presencia y no al que quedó después del proceso de tratamiento en la planta de tratamiento de agua.(1)

4.2. Manganeso. (Mn^{+2} , Mn^{+4} : PESO ATÓMICO 54.9: GRUPO VII. (METAL)

El manganeso está presente en muchos suelos, sedimentos y además en las rocas metamórficas. En el agua libre de oxígeno, se disuelve fácilmente en estado manganeso (Mn^{+2}) y puede encontrarse en las aguas de pozos profundos en concentraciones tan elevadas como 2-3 mg/L. También se encuentra junto con el hierro en el desagüe ácido de las minas. Con frecuencia, las aguas de desecho de las operaciones metalúrgicas y mineras contienen manganeso. Este un material difícil de tratar debido a la gran cantidad de complejos que

puede formar, según el estado de oxidación, pH, equilibrio entre bicarbonato-carbonato-OH y la presencia de otros materiales, en particular el hierro.

Está limitado por las normas para agua potable a una cantidad máxima de 0.05 mg/L, debido a que las concentraciones más elevadas pueden causar depósitos de manganeso y teñido de las uniones de plomería y de la ropa. Sin embargo, concentraciones aun más bajas que ésta pueden causar efectos similares, al acumularse en los sistemas de distribución en forma de depósitos, que se liberará posteriormente en concentraciones más elevadas si el ambiente se modificara, por ejemplo, cambiando el pH, el contenido en CO₂, el potencial de oxidación o la alcalinidad.

En el estado oxidado, el manganeso es bastante insoluble y puede reducirse su concentración, por procesos de coagulación, con alumbre y mediante supercloración con una filtración adecuada, incluso a un pH tan bajo como 6.5. Sin embargo, el procedimiento convencional para la eliminación de manganeso es la oxidación más la elevación en el pH de 9.0 - 9.5, con la retención de aproximadamente 30 minutos en un tanque de oxidación antes de la filtración. Los filtros que han adquirido un recubrimiento de óxidos de manganeso pueden funcionar de

forma muy efectiva, pero pueden desprender manganeso si el ambiente acuático cambia radicalmente. (1)

5. Efectos de la presencia de hierro y manganeso en la salud.

Hasta donde se sabe, en concentraciones e ingesta diaria elevadas y en casi todas sus sales, puede ocasionar daños en la salud, ya que éste genera radicales libres bajo ciertas condiciones, lo cual puede provocar enfermedades de la mitocondria, por que los radicales libres dañan el DNA mitocondrial y hacen agujeros en la mitocondria, empeorando el problema. Por lo tanto, el hierro en exceso es teóricamente dañino, por lo que las aguas que contengan hierro y manganeso deben tener una concentración permisible de 0.3 ppm para Fe y 0.05mg/L para manganeso. Los daños que éstos pueden ocasionar en la salud se describen a continuación:

5.1. Hierro

El exceso de hierro es tóxico y provoca vómitos, diarreas y lesiones intestinales. Se puede acumular hierro en el cuerpo cuando una persona se somete a terapias con cantidades excesivas o durante demasiado tiempo, cuando recibe varias transfusiones o en el alcoholismo crónico. La enfermedad por exceso de hierro (Hemocromatosis) es un trastorno hereditario en

el que se absorbe demasiado hierro potencialmente tóxico, pero fácilmente tratable. Por lo general los síntomas no se manifiestan hasta la mediana edad y su desarrollo es insidioso. La piel adopta una coloración bronceada, se produce cirrosis, cáncer hepático, diabetes e insuficiencia cardíaca y el paciente fallece prematuramente. Los síntomas pueden incluir artritis, impotencia, infertilidad, hipotiroidismo y fatiga crónica. Los análisis de sangre pueden determinar si una persona tiene exceso de hierro. Todos los parientes de una persona afectada deben ser examinados. Las sangrías repetidas constituyen el tratamiento preferido. El diagnóstico precoz y el tratamiento permiten una larga supervivencia con una calidad de vida muy normal. (2).

5.2. Manganese

La intoxicación con manganese es frecuente sólo en personas que trabajan en las minas y refinan minerales de manganese. La exposición prolongada provoca lesiones nerviosas, con síntomas que se parecen al parkinsonismo; temblores y dificultad en los movimientos.

Debido a que su metabolismo es hepático y se une a las proteínas, es la forma como es transportado hacia los tejidos, además, su excreción es principalmente biliar. El incremento en

la concentración de manganeso en cirróticos se ha relacionado con anomalías en neurotransmisores. (2).

6. Remoción del hierro.

El hierro puede estar presente en el agua (a) en forma coloidal, (b) como hierro ferroso, o (c) como compuesto quelatado. La forma quelatada puede requerir oxidación de la materia orgánica que compone el quelato de modo que el hierro puede ser precipitado para su remoción. En la forma ferrosa, el hierro puede encontrarse en ciertas aguas de pozos a concentraciones tan elevadas como 25 mg/L en condiciones anaerobias. Las condiciones reductoras que permiten al hierro convertirse en soluble, en agua de pozo, también producen con frecuencia sulfuros. En el tratamiento de muchos abastecimientos de aguas municipales que contienen hierro, el agua cruda es con frecuencia aireada antes de ser introducida al clarificador, y ésta introducción de aire es a menudo adecuada para la oxidación del hierro soluble al estado férrico insoluble. Una razón por la que este proceso puede tener éxito es que

el agua se mantiene durante 60-90 minutos en el desviador del agua lluvia, antes de que sea colectada para su filtración, y ello da tiempo para que el hierro se oxide por completo.

Cuando es relativamente baja la cantidad de hierro que debe removerse, del orden de 2 a 3 mg/L, puede ser removido directamente en un filtro, pero esto requiere un oxidante más poderoso que el aire y la presencia de un catalizador, como manganeso, con un aumento del pH a un valor mínimo de 8.5, aún con ésto, el tiempo de residencia en el filtro mismo puede no ser adecuado para la oxidación completa y la remoción del hierro, y puede requerirse un tanque de retención para este propósito. La oxidación del hierro con cloro y permanganato de potasio se muestran en las dos reacciones siguientes:



(En esta reacción se requieren 0.64 mg/L de Cl₂ por cada mg/L de Fe)



(En esta reacción se requieren 0.95 mg/L de KmnO₄ por cada mg/L de Fe).

El pH tiene un efecto pronunciado en la remoción del hierro, aunque el potencial de oxidación tanto del cloro como del permanganato decrecen cuando el pH aumenta, la velocidad de la reacción aumenta de modo significativo al aumentar el pH. También la solubilidad del hierro oxidado disminuye al aumentar el pH. (1)

7. Remoción de manganeso

La remoción del manganeso del agua es semejante a la remoción del hierro. En la oxidación del cloro y del permanganato se producen diversos óxidos de manganeso aunque éstos son de poca importancia en la tecnología del tratamiento. En la mayor parte de los sistemas industriales de agua, el manganeso puede ser más molesto que el hierro a concentraciones mucho más bajas, de manera que el proceso de filtración final es crítico para la remoción exitosa del manganeso. La efectividad de la remoción aumenta de modo considerable cuando el pH se eleva hasta alrededor de 9 y el tiempo es aún más crítico que en el caso de la remoción del hierro. (1)

8. Metodologías para la Remoción de Hierro y Manganeseo.

Los diferentes métodos planteados a continuación han sido tomados de los principios en los cuales se basaron las construcciones de las grandes plantas de tratamiento de agua de los Estados Unidos, solamente han sido adecuados para la fabricación de un tratamiento de agua en pequeña escala.

8.1. Método de Contacto.

Si se mantiene el oxígeno fuera del sistema, no aeriando, se puede precipitar el hierro (II) a hierro (III) en la misma forma que el calcio en las suavización por Cal-carbonato, las zeolitas del manganeso y algunos productos filtrantes como la arena de pirolusita (MnO_2) provocan la oxidación catalítica de las sales ferrosas y manganosas.

La filtración a través de la zeolita de sodio con regeneración es efectiva para la remoción de éstos elementos; además es practicada esta remoción sin ablandamiento, sólo por el manganeso impregnado de arena verde (zeolitas) y con regeneración con permanganato de sodio. La capacidad de la arena verde ya sea para la eliminación del hierro y del manganeso es

de 0.9 libras por pie cúbico de mineral necesitando 0.18 libras de permanganato de potasio por pie cúbico para la regeneración. El flujo generalmente es de 3.0 galones/pie cuadrado/minuto, y este proceso es limitado para aguas que contengan 1.0 ppm de hierro y manganeso; por razones económicas el uso de la cal y el carbonato de sodio para la desferrización y desmanganización se restringe a las aguas duras que también se sujetan a suavización.

La literatura expresa que en algunas plantas la reducción del hierro del estado férrico al ferroso, ocurre durante la filtración, ésta reducción estuvo asociada con un agotamiento del oxígeno disuelto (OD) en la salida de los filtros. Fué hipotetizado que el agotamiento del oxígeno disuelto, se debió al crecimiento biológico que ocurre en los filtros, pero si se mantiene la concentración del oxígeno disuelto a la salida del filtro y no existe dentro del cuerpo del filtro, oxígeno, la remoción del hierro es satisfactoria. Además determinaron que después de 8 a 10 semanas continuas de operación de la planta existe un gran crecimiento biológico en los filtros. La concentración del oxígeno disuelto es reducida durante la filtración, especialmente en filtros de 18 y más pulgadas de profundidad; existe también un decrecimiento del pH y ORP (potencial oxidación-reducción), por consiguiente hay evidencias

de nitrificación en los filtros, filtros viejos experimentan la nitrificación pues el hierro fué reducido del estado férrico al ferroso más o menos al mismo tiempo que la concentración del oxígeno disuelto fue notablemente observada.

Investigaciones preliminares con precloración, indicaron que la nitrificación no puede ser inhibida en un filtro de 30 pulgadas, a menos que la dosificación del cloro se aproxime al requerido estequiométrico para la oxidación del amonio presente; sin embargo la supercloración de los filtros durante el retrolavado y seguida de una alimentación continua de lodos puede perfectamente controlar el crecimiento biológico en el filtro y prevenir la reducción del hierro del estado férrico al ferroso.

Los filtros de arena y antracita deben madurar, es decir llegar a cubrirse con óxidos hidratados para remover efectivamente el hierro y el manganeso. La alcalinidad de las piedras calizas, las dolomitas y los óxidos de magnesio los hace ser no sólo medios útiles de contacto durante la oxigenación del Mn (II) y el Fe (II); son también absorbentes poderosos, no oxidados, después que la superficie se ha cubierto con los productos de oxidación. En forma similar, la tierra diatomeas, las arcillas o zeolitas que se han cubierto con el bióxido de manganeso

tratándolas mediante Mn y MnO_4 , proporcionan entre fases muy útiles para la remoción de hierro y manganeso. (12)

8.2. Método de Aereación.

La aereación es el proceso mecánico por el cual se procura un contacto íntimo del aire con el agua. Aplicado al tratamiento de agua, la aereación transfiere moléculas gaseosas, principalmente oxígeno, del aire (fase gaseosa) al agua (fase líquida). Aunque a menudo la

meta es disolver oxígeno en agua, la aereación incluye también la remoción del agua de fases indeseables, como CO_2 y metano; este proceso se cita algunas veces como desgasificación.

La aereación está casi siempre acompañada de otros procesos o reacciones, que pueden ser de naturaleza física, química o bioquímica. La tabla 1 nos proporciona un panorama de estos procesos, con los objetivos comunes y los resultados de la aereación del agua. La aereación también se utiliza ampliamente para la oxidación de impurezas inorgánicas como por ejemplo, hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno, y para la remoción u oxidación de impurezas volátiles causantes de olor o mal sabor. La aereación cuyo objetivo es aumentar

sólo el contenido de oxígeno en el agua se lleva a cabo algunas veces en el último paso en una planta de tratamiento de agua o de desecho. (12)

Tabla No.1. Procesos de aereación en el tratamiento de agua

Procesos	Reacciones Simultáneas o Consecutivas	Resultados	Ejemplos
Aereación	Ninguna	Aumento en el contenido de oxígeno disuelto	Oxigenación de corrientes Post-aereación del efluente de una planta de aguas negras
Desgasificación	Aereación	Aumento en el contenido de oxígeno disuelto, desplazamiento de impurezas gaseosas o volátiles.	Remoción del CO ₂ , H ₂ S, metano, sabor y olor.
Aereación	Oxidación química	Oxidación de impurezas inorgánicas, aumento en el contenido de oxígeno disuelto.	Remoción de Fe, Mn, H ₂ S.
Aereación	Oxidación bioquímica	Remoción de las impurezas orgánicas por digestión bioquímica	Remoción de la DBO en el tratamiento de aguas negras.

8.2.1. Mecanismo de Aereación

Como gas, el oxígeno es ligeramente soluble en agua. A 20 °C y al nivel del mar, la concentración de saturación es de 9.5 mg/L. A ésta concentración, representa sólo el

0.00095% pero esta concentración, cuando se libera como gas, ocupa 6.7 ml, ó 0.67%, del volumen del agua que contenía.

8.2.1.1. Principios de Transferencia de Gas.

La aereación se desarrolla en tres pasos separados:

1. El aire se pone en contacto íntimo con el agua por exposición de una superficie de gran área. Esta se genera mecánicamente en forma de innumerables gotas o pequeñas burbujas, dependiendo del tipo de aereador empleado.
2. Las moléculas de gas pasan a través de esta superficie a la fase líquida. El gas debe pasar a través de una barrera delgada en la superficie líquida, antes de que llegue al grueso de la fase líquida. El líquido que se encuentra por debajo de la película llega rápidamente a mezclarse con oxígeno.
3. Las moléculas de gas se difunden alejándose de la película líquida hacia el grueso del líquido hasta que la saturación es completa.

Es obvio que una gran superficie y condiciones turbulentas, que rompen la película líquida y agitan el grueso del líquido, aumentan la velocidad de transferencia. (1)

8.2.1.2. Equipo utilizado en el método por aereación.

En el tratamiento de agua dulce, los aereadores por gravedad y los aereadores por rocío han sido tradicionalmente usados para remover hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno. Las técnicas de aereación desarrolladas para el tratamiento de aguas de desechos son aplicables también al agua dulce, aunque los requerimientos de capacidad son por lo general mucho mayores. El aereador empacado de Coke, y también una unidad de flujo por gravedad, es popular en las instalaciones de remoción de hierro y de manganeso en virtud de su simplicidad. Ver figura N°. 7.



Fig. No. 7

DISEÑO DE UN AERADOR DE AIRE DIFUNDIDO

(Aerador empacado de Coke)

En la aereación por difusión o sumergida, el aire es forzado a través del difusor, liberando pequeñas burbujas cerca del fondo del recipiente del difusor. Esto establece un buen contacto entre el oxígeno y el agua a una presión mayor que la atmosférica. Crea una gran entre-cara líquido-gas y produce burbujas de diámetro pequeño a través de los pequeños poros del difusor.

Las eficiencias y los requerimientos de potencia para los aeradores sumergidos están íntimamente relacionadas con el tipo de difusores empleados. Estos pueden ser porosos, no porosos, o de tubo perforado. El tipo de difusor utilizado se selecciona sobre la base de las características de la transferencia del oxígeno y de los requerimientos de mantenimiento.

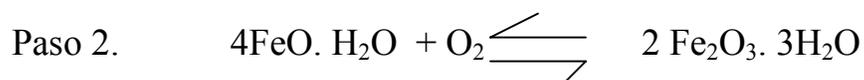
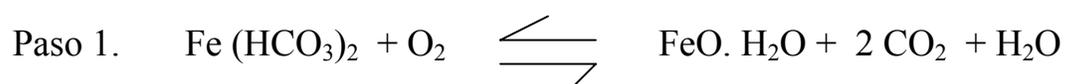
El tipo de difusor más simple es un tubo perforado que yace en el fondo del recipiente de aireación. Este arreglo se emplea en estanques o en tanques estrechos de aireación. (Los aeradores sumergidos ponen al aire en contacto más íntimo con el agua). (1)

8.3. Método de Oxidación por aereación y sedimentación.

En el agua subterránea, sin oxígeno disuelto, el hierro y manganeso se encuentran en estado de solución con bicarbonato o sulfato, pudiendo ser precipitado por oxidación del estado ferroso al férrico y el manganeso al mangánico.

La aereación (oxidación) seguida de sedimentación, con o sin filtración subsiguiente es un método eficiente para la remoción de los compuestos de hierro y manganeso especialmente cuando están en forma de carbonatos, la aereación liberará el gas y el oxígeno absorbido remueve además otros gases volátiles como el sulfuro de hidrógeno y se considera que las altas concentraciones de hierro son reducidas por este método hasta 0.1 ppm.

Se ha informado que 0.24 partes por millón de oxígeno precipitará 1.0 ppm de hierro y 0.29 ppm es necesario para eliminar 1.0 ppm de manganeso las reacciones son:

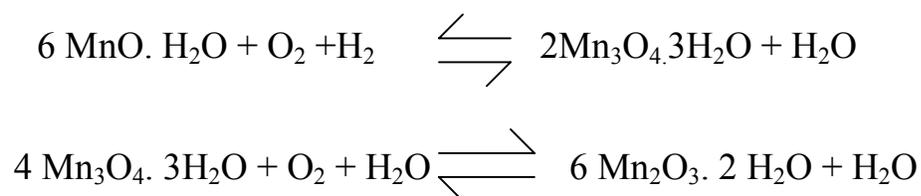


Si el hierro está ligado a compuestos como los humatos férricos, no será eliminado por la aereación, siendo necesaria la precipitación química. La inclusión de álcalis en los depósitos de sedimentación es a menudo hecha para elevar el valor del pH (rango de 9.0 a 9.6) y producir un flóculo óxido hidratado estable.

Entre los métodos de aereación están las bandejas de Coke que pueden ser lechos de contacto de grava, roca triturada, Coke o pirolusita, generalmente dispuestas en series de bateas de 12 a 16 pulgadas de profundidad, perforadas por el fondo, forman aereadores efectivos para la precipitación de estos elementos. Estos lechos son operados con flujos de 15 a 20 galones/pie²/minuto; además de servir como aereadores también precipitan los óxidos coloidales por la acción potencial catalítica de oxidación del bióxido de manganeso (MnO₂), previamente depositados y cubriendo los lechos. Raras veces reducen el hierro soluble y al manganeso debajo de 0.4 ppm.

La eliminación del manganeso en lechos de contacto de grava o piedra triturada es una función de los electrones en la superficie de los óxidos hidratados precipitados y recubriendo el material de los lechos. El óxido de manganeso hidratado formado al inicio, por la aereación se

oxidará rápidamente a óxido mangánico (Mn_3O_4) y después será transformado lentamente a óxido de manganeso Mn_2O_3 , como producto final. Las reacciones son:



En la aereación efectuada con rociadores, que pueden ser de uno o varios tubos con chiflones rociadores en sus extremos, por lo general se hace pasar el agua por una cascada con una serie de 3 a 4 saltos. Los orificios en los tubos pueden ser de 1 pulgada a 1 3/8 pulgadas de diámetro y los chiflones pueden estar espaciados de modo que se tenga 1 por cada 50 a 175 pie², el área depende de la carga necesitando una carga mínima de 8.0 pies² (usualmente 15 a 20 pies²). (1)

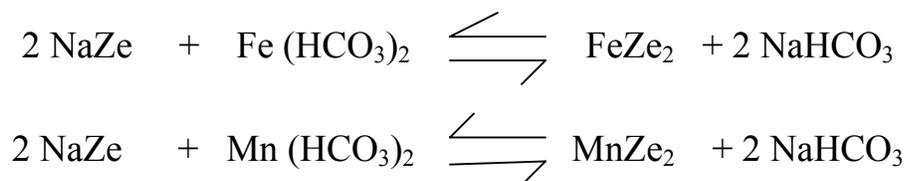
8.4. Método de resinas de intercambio Iónico

El intercambio iónico remueve de un agua cruda los iones indeseables transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico, el cual acepta y cede un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en el esqueleto del intercambiador de iones. El intercambiador iónico tiene una capacidad limitada para almacenar iones en su esqueleto llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegará

finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se lava con una solución fuertemente regeneradora que contiene la especie deseable de iones, los que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando el material de intercambio en condición útil. Esta operación es un proceso fisicoquímico, y el ciclo completo incluye de ordinario retrolavado, regeneración, enjuagado y servicio. Un ejemplo fundamental de este tipo de intercambiador es el fabricado de arenisca verde llamadas zeolitas de manganeso, la cual es un excelente intercambiador iónico para la remoción de hierro y manganeso; ésta es la forma más estable y de mayor capacidad de intercambio, la que está relacionada con la proporción en que se use el regenerador. Para este tipo de intercambiador, son soluciones de permanganato al 1N y retrolavados, que dependen de las concentraciones de hierro y manganeso con las cuales ésta entra en contacto, para este mismo proceso también existen otros tipos de materiales intercambiadores como lo son los silicatos que presentan las mismas características que las zeolitas de manganeso, pero no con tanta capacidad como ésta, la combinación de estos dos materiales permite obtener un intercambiador de gran capacidad

El tratamiento por zeolitas de sodio o intercambiadores catiónicos (ZeNa_2), es efectivo cuando los iones de hierro y manganeso están presentes en bajas concentraciones. Solamente pueden utilizarse con aguas limpias que no den precipitados que impiden el contacto necesario con las zeolitas.

A continuación se escriben las reacciones:



Estas reacciones se pueden aplicar para aguas duras las cuales poseen mayormente calcio y magnesio. Ya que estos elementos pueden eliminarlos. (3)

9. Generalidades de los Sistemas Filtrantes.

La remoción de sólidos suspendidos, al pasar el agua a través de un medio poroso, es principalmente una acción mecánica. Muchas partículas no pasan por los intersticios del filtro a causa de su tamaño. Esta acción sola, sin embargo, puede no dar una clarificación completa.

Los sólidos finamente divididos son solo eliminados por la formación de películas gelatinosas alrededor de los granos del medio filtrante. En algunos filtros este recubrimiento de los granos se obtiene por una acción biológica, la cual es más acentuada en los filtros lentos de arena, en los cuales se forma una capa limosa, técnicamente llamada Schmutzdecke (ZOOGLA) sobre la superficie del lecho filtrante. La resistencia de la capa a la rotura se debe usualmente a su

relación con los organismos microscópicos. La masa reticular que ellos forman ayuda a la clarificación. También pueden formarse flóculos mediante varios productos químicos para crear una capa biológica artificial.

La profundidad a la cual los sólidos penetran en el lecho de arena, depende, en gran parte, del flujo de filtración, el grado de pre-tratamiento, así como de las dimensiones y graduación de la porosidad del medio filtrante. Conforme pasa el tiempo, aumenta la eficiencia de un filtro operada adecuadamente. La materia floculada llena los espacios vacíos del lecho filtrante y la capa artificial produce intersticios más finos y ayuda a la remoción de sólidos solubles como a la remoción de los sólidos suspendidos al reducir la dimensión de los canalitos en el medio filtrante. (4)

9.1. Filtración por gravedad (filtración lenta).

Filtros Mecánicos.

Los filtros pueden ser rectangulares o circulares y se construyen de madera, acero, o concreto.

En el fondo se encuentra un sistema de drenaje inferior que recoge el agua filtrada y distribuye el agua de retrolavado. Sobre el drenado bajo se coloca una capa de piedra graduada, antracita o

grava, y sobre ella de 24 a 36 pulgadas de medio filtrante. El conjunto se complementa con válvulas dotadas de controladores para influente y efluente lo que mantiene un flujo uniforme de agua a través del aparato,

El agua entra por la parte superior y pasa hacia abajo a través del lecho filtrante. El agua filtrada fluye por la técnica de drenaje inferior y descarga de ahí al sistema que la contendrá.

Para limpiar la unidad, se detiene el proceso de filtración y se alimenta con agua filtrada de abajo hacia arriba por retrolavado. Son llamados filtros lentos debido a que es la fuerza de gravedad la que impulsa el agua hacia dentro del lecho, lo cual los hace un poco menos efectivos en cuanto a volumen de agua tratada que se obtiene de éstos.(4)

9.2. Filtración a presión.

Los filtros a presión son esencialmente iguales a los filtros de gravedad, con la excepción que el material filtrante está contenido en un tanque cerrado y el agua es forzada a través del lecho filtrante bajo una presión relativamente alta. Este tipo de filtración ha encontrado demanda en la industria de calderas, ya que el equipo puede instalarse en línea a presión, eliminando un bombeo adicional. Estos filtros son construidos de acuerdo a la necesidades del proceso;

existen dos formas: verticales y horizontales, así también de acuerdo al tipo de agua a tratar; la desventaja de éstos es que debido al corto tiempo que el agua permanece en contacto con el lecho filtrante, éste debe poseer un proceso previo el cual es un tanque de sedimentación, por lo que es un método costoso.(4)

9.3. Filtración en medio granular.

La filtración en medio granular es, por lo general, aplicable en la eliminación de sólidos suspendidos en el intervalo de 5 a 50 mg/L cuando se desea un efluente menor que 1 UTJ. Se han empleado filtros de arena durante muchos años como un paso final de pulido en plantas de aguas municipales e industriales donde el efluente del clarificador contiene de 5 a 20 mg/L de sólidos suspendidos. En regiones donde se dispone de una fuente de agua cruda con una turbidez muy baja, algunas plantas trabajan con un medio granular, como única forma para la eliminación de sólidos, sobre todo, en aguas para procesos industriales. Se emplean también los filtros en medio granular para filtrar corrientes laterales de agua de enfriamiento, para reducir la formación de sólidos suspendidos cuando no es crítica la claridad del efluente. Los filtros con medio granular pueden tratar sólidos suspendidos hasta 1000 mg/L y producir una eliminación del 90%. (Ver anexo # 3)

La eliminación de sólidos por filtración incluye varios mecanismos, algunos de carácter físico y otros de carácter químico. Estos mecanismos incluyen la adsorción y el colado.

La adsorción depende de las características físicas de los sólidos en suspensión y del medio filtrante. Esta es una función del tamaño de grano del medio filtrador y de las propiedades del floculo, como el tamaño, la resistencia al esfuerzo cortante y adhesividad. También afectan a la adsorción las características químicas de los sólidos suspendidos, el agua y el medio filtrante. El área de la superficie donde se efectúa la adsorción es del orden entre 3000 a 5000 pie^2 de medio. El colado que se presenta en todos los filtros de medio granular, es el factor principal que determina la jornada del filtro. La característica principal del diseño de un buen filtro es el de reducir a un mínimo el colado, ya que produce una pérdida rápida en la presión. Esto es debido a que el colado forma una torta sobre la superficie del lecho filtrante (en especial, en los filtros de arena), de manera que la torta depositada actúa como medio filtrador. El medio del filtro se vuelve más fino a medida que se forma la torta y la pérdida de presión aumenta exponencialmente con el tiempo.

De los diferentes tipos de medios de filtración empleados para eliminar sólidos suspendidos, el más común es la arena de sílice, aunque la antracita triturada también se usa con frecuencia.

Cuando se emplea un solo medio, como arena de sílice, en el recipiente del filtro se clasificará conforme al tamaño, encontrándose en la parte superior las partículas más pequeñas. Cuando el agua fluye por la arena hacia abajo, que es la forma tradicional, los sólidos forman un colchón en la superficie, y la filtración típica tiene lugar en las primeras pulgadas superiores del filtro. La arena se limpia lavándola hacia arriba con agua o con agua y aire (enjuague) y esto clarifica al lecho hidráulicamente, manteniendo el material más fino en la parte superior.

Si un filtro pudiera cargarse con los granos mayores en la parte superior y los más pequeños en el fondo, esta gradación de grueso a fino permitiría una penetración en profundidad y el incremento de sólidos almacenados permitiría jornadas mayores para los filtros. Sin embargo, puesto que el enjuague del filtro hace fluido el lecho, la arena enjuagada regresará nuevamente a la gradación de fina a gruesa.

Si se emplea un lecho con un solo medio, la única trayectoria para filtración de gruesa a fina es por flujo ascendente. El agua entra por el fondo del lecho. Los sólidos pueden penetrar el

medio de grano grueso, dando como resultado una filtración más profunda en el lecho. El enjuague se efectúa en la misma dirección que la filtración. El lecho es clasificado fino en la parte superior y grueso en la inferior. Los filtros de flujo ascendente operan hasta 5 gpm/pie².

Los filtros típicos de un solo medio con flujo descendente operan a 2 (gpm)³/pie² de superficie de lecho en servicio de agua potable y hasta 3 gpm/pie² de filtración industrial. El lecho de filtro tiene una profundidad de 24 a 30 pulgadas, soportada sobre varias zonas de diferente graduación de la grava.

La arena de sílice tiene de ordinario un tamaño de grano de 0.5 a 0.8 mm. La antracita es de ordinario de 0.7 mm. Los granos pequeños filtran mejor, pero las jornadas del filtro son menores. Los granos mayores permiten jornadas más largas, pero si el flujo es muy grande se producirá la ruptura hidráulica. Un medio de grano grueso producirá un efluente aceptable y jornadas razonables para el filtro si se aumenta la profundidad. (4)

9.4. Filtración a través de Lechos Múltiples.

Un lecho de medios apilados o de dos capas (medio dual) es una respuesta para proporcionar una filtración de gruesa a fina en un patrón de flujo descendente. Los dos materiales

seleccionados tienen distinto tamaño de grano y diferente gravedad específica. De ordinario, se usa antracita molida con arena de sílice. Los granos de antracita, con una gravedad específica de 1.6 y un tamaño de grano de 1 mm, se asienta más lentamente que la arena, con una gravedad específica de 2.65 y un tamaño de grano de 0.5 mm, de modo que la antracita de grano grueso descansa sobre la arena de grano fino, después del enjuague. En un lecho típico de medio dual, se colocan 20 pulgadas de antracita encima de 10 pulgadas de arena. La antracita gruesa permite una penetración más profunda en el lecho y proporciona jornadas de filtro más largas a velocidades normales, este medio dual puede producir un efluente aceptable para flujos bajos hasta de 5 gpm/pie² de área de lecho.

Así como el medio dual de grueso a fino es más efectivo que el filtro de un solo medio, pueden lograrse mejoras posteriores introduciendo bajo la arena un tercer medio de grano más pequeño y más pesado. El granate, con una gravedad específica de 4.5, y un grano muy fino, se asienta más rápidamente que la arena de sílice y puede emplearse como capa de fondo. Un medio múltiple típico contiene 18 pulgadas de 1.0 a 1.5 mm de antracita, 8 pulgadas de arena sílice de 0.5 mm y 4 pulgadas de granate de 0.2 mm a 0.4 mm. Este filtro opera con

flujos grandes y ofrece una penetración más profunda y jornadas más largas para el filtro que los filtros de medio único o de medio dual.

Para diseñar un filtro de rendimiento máximo, lo primero que debe tomarse en cuenta es la calidad deseada del efluente. La selección del diseño del filtro que se requiere para tener un efluente de 0.1 UTJ es distinta a la que se requiere para producir 1.0 UTJ.

Es crítica la velocidad de flujo a través del filtro, ya que limita el rendimiento y determina el número de filtros necesarios. De ordinario, a medida de que el flujo aumenta también lo hace la penetración en el filtro. La velocidad de flujo está limitada por la presión y por las dimensiones del medio. A medida que el medio empieza a cargarse con sólidos, la velocidad neta para un flujo dado aumenta hasta que las fuerzas cortantes rompen los sólidos, que escapan por el efluente. La mayor parte de los filtros están diseñados para ser enjuagados antes de que presenten este rompimiento en un punto determinado por la pérdida de presión.

Los filtros de medio único son enjuagados cuando la pérdida de presión, alcanza los 10 pies/m³ aproximadamente. En el caso de filtraciones profundas, se tolera una pérdida de presión de 15 a 20 pies/m³. En un medio de grano más fino, ya que la eliminación de sólidos

se lleva a cabo en las primeras pulgadas, un aumento en la profundidad del lecho es de poca utilidad, salvo por el hecho de que mejora la distribución hidráulica. Pero, en filtros de grano grueso, donde se desea una penetración grande, cuanto más grueso sea el medio tanto más profundo deberá ser el lecho a igualdad de la salida del efluente.

La temperatura del agua afecta al desempeño del filtro, debido a la viscosidad. A 32°F la viscosidad del agua es 44% mayor que a 72° F por otra parte el enjuague mejora con agua fría, ya que a mayor viscosidad más efectiva es la remoción de los sólidos del lecho. La formación de flóculos es mucho más lenta a temperaturas bajas, de modo que la capacidad de filtración en una planta determinada puede variar con la estación del año. En verano los flóculos pueden permanecer en la superficie, mientras que en el invierno penetran profundamente en el filtro. (1)

10. Materiales de los Sistemas de Filtración

Muchas sustancias han sido empleadas y se usan actualmente, para el filtrado de abastecimientos industriales de agua. Estas comprenden arena, coque, carbón vegetal,

partículas de mármol etc. Los materiales utilizados para fines sanitarios son siempre los mismos utilizados para el tratamiento industrial de aguas. (13)

10.1. Arena.

La arena es el medio más ampliamente usado para la filtración de agua fría. La selección del grano adecuado y tamaño de las arenas, así como el espesor del lecho, son características esenciales en el diseño de un filtro. La arena empleada en filtros destinados a tratamiento de agua para calderas deberá ser escogida tan cuidadosamente como la que se emplea en el tratamiento de agua para fines sanitarios. El material preferido es arena de cuarzo puro, libre de barro, arcilla u otro material soluble en ácido. El tamaño más deseable de arena varía con la clase y temperatura del agua a tratar, los flujos a que funcionará el filtro, la profundidad del lecho, y otros factores.

Ha habido una tendencia en los últimos años a utilizar arena gruesa, la cual originalmente se creyó que no sería satisfactoria para filtros rápidos de arena. Algunos ingenieros han utilizados arena con un tamaño efectivo de 0.60 mm o mayor. La eficiencia total de un medio filtrante, incluyendo la longitud de los ciclos entre lavados, obviamente es efectuada por la graduación

hidráulica del material. Los mejores resultados se obtienen con un material que sea de dimensiones uniformes. (13)

10.2. Grava

Este tipo de rocas son las llamadas rocas sedimentarias que son las formadas por capas en paralelo, de partículas sólidas unidas por compuestos que actúan como el cemento, los cuales pueden ser: sílice, carbonato de calcio y óxido de hierro, los cuales sufren alteraciones posteriores provocadas por la acción atmosférica (estas perturbaciones pueden ser de origen químico o mecánico).

En El Salvador la disponibilidad de este tipo de roca es muy abundante; en cuanto a la calidad de arena y grava varía mucho, desde yacimientos que tienen una buena calidad, hasta lugares que poseen una calidad inferior.

Existen en el país aproximadamente reservas mayores de 300,000 m³ de arena y grava de buena calidad. (13)

10.3. Rocas Ígneas. (Lava).

Este es un compuesto formado por cantidades apreciables de sílice, oxígeno, aluminio, compuestos alcalinos, hierro y otros elementos en menor porcentaje como: cloro, flúor, azufre, fósforo, bióxido de carbono.

Pertenece a las rocas ígneas (formaciones por la solidificación del magma), extrusivas (volcánicas) que se enfrían sobre la superficie de la tierra, balsáticas (50% de sílice en promedio). La forma en que pueden apreciarse en la superficie de la tierra es como fragmentos heterogéneos, anguloso o bien rocas extremadamente fracturadas y plegadas, de cavidades irregulares.

En la Tabla (2) se presenta la composición química de dos tipos de lava procedentes de dos lugares donde se encuentra este material en gran abundancia en nuestro país: la de Quezaltepeque (volcán de San Salvador) y la del volcán de San Miguel.

TABLA No 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA LAVA SALVADOREÑA

Elemento	Oxido	Lava de Quezaltepeque % oxido	Lava de San Miguel % oxido
Si	SiO ₂	51.360	47.080
Al	Al ₂ O ₃	15.120	19.278
Fe	Fe ₂ O ₃	16.016	10.468
Ca	CaO	1.769	3.598
Mg	MgO	1.726	2.576
Na	Na ₂ O	3.68	2.835
K	K ₂ O	1.603	0.844

FUENTE: misión Geo. Alemana (1973). (12)

10.4. Pirolusita.

La pirolusita es un material que tiene capacidad catalítica sobre la reacción de oxidación del manganeso. Esta particularidad de catalizar la reacción se debe a que tiene valencia alta (IV), su fórmula es MnO₂ y además; también tiene la propiedad de adsorción de los hidróxidos y óxidos de manganeso que se forman en la oxidación/reducción de los minerales. La capacidad

de la arena verde (pirolusita) ya sea para la eliminación del hierro o manganeso es de 0.09 libras por pie cúbico de mineral, necesitando 0.18 libras de permanganato de potasio por pie cúbico para la regeneración. El flujo generalmente es de 3.0 galones por pie cuadrado por minuto, y éste proceso es limitado para aguas que contengan 1.0 ppm de hierro y manganeso.

(12)

CAPITULO II. PARTE EXPERIMENTAL.

En este capítulo se detallan los procedimientos para la investigación de campo, selección y preparación de los materiales filtrantes, elaboración del filtro, toma de muestra, determinación de la eficiencia del filtro y del tiempo de vida útil; uso y mantenimiento.

2. Investigación Bibliográfica.

Se realizó una investigación bibliográfica para decidir el procedimiento de como tratar el agua. En esta etapa se decide que los procesos de aereación (oxidación), precipitación con floculantes, sedimentación del precipitado por medio de un decantador y filtración del sobrenadante; son el conjunto de procesos que mejores resultados proporciona para tratar grandes volúmenes de agua. Sin embargo para nuestro fin, que es la elaboración de un sistema eficiente, económico, de aplicación doméstica (fácil operación y poco mantenimiento); se opta sólo por los procesos de aereación y filtración, ya que es un procedimiento que no requiere reactivos ni estructuras difíciles de construir.

Se diseñó un filtro, de manera que se obtenga la mayor eficiencia posible; para ésto se toman en cuenta variables como: estabilidad del lecho filtrante y tiempo de aereación, luego para comprobar la efectividad del filtro diseñado se filtraron muestra reales, de comunidades que presentan el problema de altas concentraciones de hierro y manganeso en el agua potable.

Las fuentes de información que sirvieron para determinar los lugares de muestreo, fueron datos proporcionados por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) referente a fuentes con problemas de hierro y manganeso. Las altas concentraciones de hierro y manganeso en el agua es un problema que se encuentra ampliamente diseminado

en nuestro país, debido en primer lugar a que las principales fuentes del recurso hídrico son los mantos acuíferos subterráneos y en segundo lugar a la naturaleza química de nuestros suelos.

2.1. Investigación de Campo.

2.1.1. Lugares de muestreo

El segundo paso es la determinación de la concentración de hierro y manganeso, presentes en el agua a tratar con el filtro diseñado, por lo que se hace necesario definir, de dónde tomar las muestras.

Los lugares de muestreo fueron elegidos, basándose en referencias de quejas interpuestas en el Centro para la Defensa del Consumidor (CDC) y la información proporcionada por ANDA sobre los lugares que tienen altas concentraciones de hierro y manganeso.

De los 19 municipios del departamento de San Salvador, a los que ANDA provee el servicio de agua potable, se encontró que hay 10 municipios cuyos pozos tienen concentraciones de hierro y manganeso arriba de la norma durante ciertas épocas del año; los cuales a pesar del tratamiento que ANDA les da, (que consiste en la adición de un secuestrante llamado SEA QUETZ que forma partículas coloidales), se salen de los límites máximos admisibles de la Normativa Salvadoreña Obligatoria para agua potable. (NSO 13.07.01:97) . (Ver anexo 1)

El muestreo se realizó tomando como base el muestreo aleatorio, denominado también muestreo probabilístico ya que se pueden usar las leyes de la probabilidad. (9)

La aleatoriedad es una propiedad del procedimiento muestral que puede entrar en un proceso de muestreo de distintas formas, y por lo tanto las muestras aleatorias pueden ser de diferentes tipos: simple, sistemático, estratificado y por conglomerados.

De estos métodos se utilizó el muestreo por conglomerados que consiste en seleccionar primero, grupos al azar; llamados conglomerados de elementos individuales de la población, y en tomar luego todos los elementos o una submuestra de ellos dentro de cada conglomerado para constituir así la muestra global, siendo un muestreo de 2 etapas.

Se escogió este método ya que era el que más se adecuaba a las condiciones de los lugares de muestreo. En primer lugar porque las características socioeconómicas son similares. En segundo lugar porque las colonias son de tipo urbano y el sistema de abastecimiento de agua es a través de un pozo de agua subterránea, el cual obviamente no puede dejarse fuera de la muestra. De tal manera que se escogieron primero los grupos o conglomerados; siendo el pozo central un conglomerado (punto de muestreo) del cual se obtendría una muestra. El segundo conglomerado estaría formado por las casas a las que el pozo abastece, de estas se escogerían 2 casas al azar para obtener una muestra de cada una. El objetivo de obtener 3 muestras de cada lugar de muestreo, es de verificar la repetibilidad del método de análisis.

Se seleccionaron tres municipios del departamento de San Salvador, los cuales presentan este problema: Soyapango, Ilopango y San Salvador. Cada una de las comunidades de los tres municipios que formaron el conglomerado tuvo la probabilidad de formar parte de la muestra,

ya que se hizo una elección aleatoria de las comunidades a muestrear, de donde se obtienen los siguientes resultados:

Tabla N° 3: Municipios y sitios de muestreo

Municipio/Lugar	Soyapango	Ilopango	San Salvador
1	Col. El Limón	Col. San Felipe	Col. Sta. Carlota. Bo. San Jacinto
1	Col. Prados de Venecia		

El municipio de Soyapango es el que tiene la mayor incidencia del problema de hierro y manganeso, por esta razón se eligen dos puntos de muestreo, donde según el historial, se encuentran las concentraciones más altas de cada uno de los metales; los lugares elegidos son la colonia El Limón y la colonia Prados de Venecia. (Ver anexo N°. 5)

En el municipio de Ilopango, se elige la colonia San Felipe, donde se encuentra el pozo con la concentración más alta de manganeso de toda el área del departamento de San Salvador, por esta razón también se incluyó como lugar de muestreo.

En el municipio de San Salvador, se elige la Colonia Santa Carlota, debido a que es la que presenta la mayor problemática en el municipio.

2.1.2. Toma de Muestra.

Inicialmente se hace necesario realizar una inspección de los lugares a muestrear, para verificar el tipo de distribución de agua que tenía la zona.

Todos los lugares fueron seleccionados por poseer pozos de aguas subterráneas, ya que estos presentan una mayor problemática de altas concentraciones de hierro y manganeso con respecto a las fuentes de aguas superficiales.

La cantidad de muestra a tomar es de 2.5 galones. Los recipientes son de plástico de la misma capacidad. El recipiente se llena completamente para evitar el contenido de aire, que pudiera dar lugar a reacciones de oxidación del hierro y que se deposite en las paredes del recipiente. Se recomienda hacer el análisis el mismo día que se recolecta la muestra, para evitar la precipitación de los minerales se preserva con ácido clorhídrico concentrado a razón de 1 ml de HCl por litro de muestra; ya que con ello se obtiene un pH entre 2.5 y 3.0 que solubiliza los hidróxidos de hierro y manganeso presentes en las muestras.(10)

2.2. Selección de los Materiales.

En base a las propiedades que presentan; los materiales seleccionados inicialmente fueron: grava, arena, lava volcánica y pirolusita, un tubo para el lecho filtrante, un tubo para el tanque aereador, una bomba eléctrica de aire y una válvula. La novedad de este filtro es la inclusión de lava volcánica y pirolusita.

Lava: se incluyó debido a su capacidad de adsorber sobre su superficie los hidróxidos de hierro y manganeso que previamente se han formado en el proceso de aereación. Esta propiedad se la da su naturaleza química en la que destaca su alto contenido de silicatos. Otra propiedad importante de la lava es su alta porosidad que es de 26% (espacio vacío) y también por su fácil obtención.

Pirolusita: es un material que se seleccionó debido a su capacidad catalítica sobre la reacción de oxidación del manganeso. Esta particularidad de catalizar la reacción de oxidación del manganeso se debe a que tiene valencia alta (IV), su fórmula es MnO_2 y además también tiene la propiedad de adsorción de los hidróxidos y óxidos de manganeso que se forman.

Arena: es la capa superior del filtro y tiene la función de proteger de deformaciones al lecho filtrante de lava volcánica. Además, según otras investigaciones realizadas, tiene propiedades de retención de microorganismos.

Grava: es el nivel inferior del filtro denominado capa de sostén. Estos materiales están contenidos en un tubo plástico de 92 mm de diámetro interno por 60.5 cm de altura.

El Aereador: es un contenedor plástico transparente, que contiene el agua que será tratada con la bomba de aire, para ser oxigenada. El tubo del filtro está pegado al tanque aireador con silicón, para sellar completamente la unión de los materiales.

El agua contenida en el aereador se trata por medio de una bomba eléctrica de aire, que provee el oxígeno que oxidará a los metales. Este material es de gran importancia porque tiene una relación directa en lo concerniente a la eficiencia del filtro. Esta bomba trabaja a una velocidad de 2 litros de aire por minuto y de esta magnitud depende el tiempo de aereación a que se someterá el agua. Se prefiere trabajar con una bomba eléctrica debido a que ofrece

ventajas sobre un sistema manual de aereación, por ejemplo mayor flujo y mayor facilidad de operación.

2.3. Preparación de los Materiales.

Pirolusita.

Dado que la pirolusita es un polvo fino, no necesita ningún tratamiento previo y se aplica directamente.

Grava.

La preparación de la grava, comienza a partir de la *molienda*, la cual se realizó manualmente con una almádana para reducir el tamaño de las piedras. Este proceso, a nivel industrial se realiza con molino de martillos o de bolas. El segundo paso es el *tamizado*, para lo cual se utilizan tamices de la serie U.S. Estándar. (Ver figura N° 1) y el agitador mecánico para tamices ROTAP (ver figura N° 2). Se selecciona la grava que pasa el tamiz #8 y queda retenido en el #16 lo cual corresponde a un tamaño de partícula de entre 1.18 a 2.36 mm. El tercer paso es el *lavado*, que se realiza para retirar todos los restos de tierra y materia orgánica que pudiera existir en sus intersticios. Para esto se usa una cristalería especial cilíndrica con fondo de plato poroso para pasarle agua a contracorriente (de abajo hacia arriba). El cuarto paso es la *esterilización*, la cual se realiza en una estufa a una temperatura de 160° C por 90 minutos. (13)

Arena.

La preparación de la arena, comienza a partir del tamizado. Para este proceso se utilizaron los tamices #8, #16, #20 y #30. Se coloca la arena sobre el tamiz #8 para seleccionar la que pasa el tamiz # 20 y queda retenida en el tamiz # 30 lo cual corresponde a un diámetro de partícula de entre 0.60 mm y 0.85 mm. Se descarta lo retenido en los tamices #16 y #20. También se lava con abundante agua a contracorriente y se esteriliza.

Lava volcánica.

La lava volcánica se somete primero a un proceso de *trituration*, para lo cual se utilizó una maquina fabricada por la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador, conocida como triturador de quijadas, la cual permitió reducir el tamaño de las piedras de las partículas de un diámetro de entre 10 y 15 cm a un diámetro de entre 2 a 4 cm.

Como segundo paso se procede al proceso de *molienda* , la cual se realizó manualmente con una almádana para reducir el tamaño de las piedras de 2 a 4 cm hasta polvo fino.. El tercer paso es el *tamizado*, primero se selecciona el material que pasa la malla #30 y que queda retenido en el tamiz #60, esto corresponde a un tamaño de partícula comprendido entre 0.25 y 0.60 mm (lava B). Para realizar esta operación, también se colocan las mallas #8 (con abertura de 2.36 mm), la malla #12 (con abertura de 1.7 mm) y la malla #20 (con abertura de 0.85 mm), esto con el objetivo de no saturar ninguno de los tamices y hacer más efectivo el proceso de tamización. Luego, por cuestiones de diseño se procede a tamizar los polvos finos que quedan en el proceso anterior (retenida en la malla #60) para recolectar la arenilla que pasa la malla

#60 y queda retenida en la #100 la cual corresponde a un tamaño de partícula entre 0.15 y 0.25 mm. (Lava A). También se recolectan los residuos de las mallas #20 y #30 (los que pasaban la malla 12 y quedaban en la 30) que corresponde a un tamaño entre 0.6 y 1.7 se le denomina lava C y se sustituye en lugar de la grava.

El cuarto paso en la preparación de la lava volcánica es el *lavado*, y el quinto paso es la *esterilización*



Figura 8: Tamices US Estándar



Figura 9: Agitador ROTAP

En el cuadro siguiente se presentan los tamaños de partículas obtenidos para cada material durante el proceso de trituración y tamizado.

TABLA 4: TAMAÑOS DE PARTÍCULA DE CADA MATERIAL UTILIZADO

MATERIAL	RANGO DE TAMAÑO (mm)
Capa de sostén grava	1.18 – 2.36
Arena	0.60 – 0.85
Lecho filtrante de lava volcánica (lava B)	0.25 – 0.60
Finos de lava volcánica (lava A)	0.15 – 0.25
Capa de sostén lava (lava C)	0.60 – 1.70

Después de la preparación de la lava volcánica, se hace necesario un análisis granulométrico, con la finalidad de determinar las características físicas importantes de este material, ya que es el que se encuentra en mayor proporción. Se realizaron dos tipos de análisis granulométricos: el convencional, que da una caracterización general del material analizado, como es el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad; y el estadístico que nos da una caracterización más amplia, ya que se obtienen magnitudes del material analizado como superficie, porosidad, número de partículas por gramo.

2.4. Análisis Granulométrico Convencional.

Es el análisis por medio del cual se determina el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad.

Tamaño efectivo se define como el tamaño de grano, tal que el 10 % en peso de las partículas son menores y el 90% mayores que él mismo. (D_{10})

El coeficiente de uniformidad designa la proporción entre el tamaño del grano que tiene el 60% de la muestra más fino que él y el tamaño (tamaño efectivo) que tiene el 10% más fino que él. (D_{60} / D_{10})

Según la Asociación americana de Trabajos de Agua (AWWA), se ha considerado que un lecho filtrante con un tamaño efectivo de aproximadamente 0.35 mm y un coeficiente de aproximadamente 1.75 dará un servicio satisfactorio. (6)

Para estas determinaciones, se pesaron 200 gramos de la muestra de lava volcánica, previamente tamizada, lavada y secada, se colocó sobre la torre de tamices que estaban ordenados en el orden siguiente: fondo, malla #100 (0.15 mm), malla #60 (0.25 mm), malla #50 (0.30 mm), malla #40 (0.425 mm) y malla #30 (0.60 mm). Se tamizó por medio del agitador mecánico para tamices ROTAP, durante 15 minutos y se pesó lo retenido en cada tamiz.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en estas determinaciones:

TABLA N° 5: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO CONVENCIONAL.

Malla	Abertura mm	Masa A	Masa B	% pasado
30	0.600	0.9	199.1	99.55
40	0.425	88.6	110.5	55.25
50	0.300	59.4	51.1	25.55
60	0.250	45.1	6.0	3.00
100	0.150	5.5	0.5	0.25

Masa A: masa de lava retenida por el tamiz.

Masa B: masa de lava no retenida por el tamiz.

A partir de estos datos, se graficó en papel semilogarítmico el porcentaje pasado en peso en las abscisas contra el tamaño en mm en las ordenadas para obtener el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad. El tamaño efectivo fue de 0.27 mm y el coeficiente de uniformidad de 1.54. (Ver anexo N°. 7)

2.5. Análisis Granulométrico Estadístico. (7)

A continuación se presentan los cálculos realizados para la determinación de otras expresiones importantes significativas de las pequeñas partículas como diámetro medio geométrico de la distribución de peso (dg'), diámetro medio aritmético (da), diámetro medio de volumen (dv), diámetro medio de volumen superficie (dvs), número de partículas (N), densidad (ρ), porosidad y superficie específica (S). Estos datos servirán mas adelante para calcular el espacio vacío en el lecho filtrante y así, poder estimar la vida útil.

TABLA N° 6: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ESTADÍSTICO

Rango μm	Media (2)	Peso retenido	% retenido (4)	% acumulado	2 x 4
425 – 600	512.5	88.6	44.6	44.6	22857
300 – 425	362.5	59.4	29.9	74.5	10838
250 – 300	275	45.1	22.7	97.2	6242
150 – 250	200	5.5	2.8	100.0	550
198.6					40487

A partir de estos datos se grafica en papel probabilístico-logarítmico el porcentaje acumulado en las abscisas (escala probabilística), contra tamaño medio en las ordenadas (escala logarítmica). Por medio de la gráfica, se interpola para obtener el diámetro medio geométrico (**dg**) que es el tamaño que corresponde al 50% en el eje de porcentaje acumulativo y la desviación tipo geométrica (σ_g), que es el cociente de la razón (tamaño 50%) / (tamaño 16%) o (tamaño 84%) / (tamaño 50%).

Ecuaciones para calcular los diámetros estadísticos

- Diámetro medio aritmético (da): $\log da = \log dg + 1.151 \log^2 \sigma_g$
- Diámetro medio de volumen (dv): $\log dv = \log dg + 3.454 \log^2 \sigma_g$
- Diámetro medio de volumen-superficie (dvs): $\log dvs = \log dg + 5.757 \log^2 \sigma_g$

donde σ_g es la desviación tipo geométrica = (tamaño 84%) / (tamaño 50%).

dg es el diámetro medio geométrico (tamaño 50%)

Estos datos se obtienen por medio del gráfico del análisis estadístico. (Ver anexo N°.6)

a) Diámetro medio aritmético: es la media aritmética de los diferentes diámetros de las partículas que conforman la muestra. Se puede calcular empleando directamente los datos anteriores, considerando la muestra una distribución normal para determinar la media muestral

$$\bar{X} = \sum (X_i f_i) / n \quad da = 40487 / 100 = \mathbf{405 \mu m}$$

b) Diámetro medio geométrico (dg) (tamaño 50%) :

$$\mathbf{dg = 460 \mu m \text{ (ver gráfico en anexo N}^\circ \mathbf{. 6)}}$$

c) Diámetro medio aritmético por medio de fórmula

$$\log da = \log d'g - 5.757 \log^2 \sigma_g$$

$$\log da = \log 460 - 5.757 [\log (340/460)]^2$$

$$= 2.66 - 0.099$$

$$= 2.56$$

$$\mathbf{da = 366.1 \mu m}$$

d) Diámetro medio de volumen:

$$\log dv = \log d'g - 3.454 \log^2 \sigma_g$$

$$= \log 460 - 3.454 [\log (340/460)]^2$$

$$= 2.66 - 0.0595$$

$$= 2.60$$

$$\mathbf{dv = 401.08 \mu m}$$

e) Diámetro medio volumen-superficie

$$\log dvs = \log d'g - 1.151 \log^2 \sigma_g$$

$$= \log 460 - 1.151 [\log (340/460)]^2$$

$$= 2.66 - 0.02$$

$$= 2.64$$

$$\mathbf{dvs = 439.4 \mu m}$$

f) Densidad verdadera (ρ)

- 1- Pesar picnómetro con agua a temperatura constante (27.6°). Peso picnómetro: **42.2262 g**.
- 2- Pesar 1 g de lava. Peso real: 1.001 g
- 3- Colocar la muestra pesada de lava en el picnómetro y llenar con agua.
- 4- Pesar picnómetro con agua y muestra previamente pesada (1.001 g) a la temperatura de 27.6°. Peso total: **42.8477 g**
- 5- Restar peso en $\textcircled{2} - \textcircled{1}$: $42.8477 - 42.2262 = \mathbf{0.6215\text{ g}}$ \equiv masa de agua desplazado por muestra.
- 6- Encontrar volumen de 0.6215 g de agua = volumen de muestra.

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} (27.6^\circ \text{C}) = 0.9963782 \text{ g/ml} \quad (\text{por tablas}) \quad (3)$$

$$\text{Vol} = \text{Pmx} / \rho$$

$$= 0.6215 / 0.996378 = \mathbf{0.62376\text{ ml}}$$

- 7- Densidad real: $\text{Peso mx} / \text{Volumen mx}$ $1.001 / 0.62376 = \mathbf{\underline{1.6048\text{ g/cm}^3}}$

g) Densidad referida al volumen total (ρ_b)

- 1- Pesar probeta de 100 ml limpia y seca: **122.00 g**
- 2- Pesar probeta con muestra compactada hasta la línea de los 100 ml: **239.56 g**
- 3- Restar 2 - 1 : **117.56 g**
- 4- $\bullet b = 117.56 / 100 = \mathbf{\underline{1.1756\text{ g/cm}^3}}$

h) Porosidad Total (P):

$P = 1 - (\rho_b / \rho) \times 100$ donde ρ_b es densidad referida al volumen total y ρ es la real.

$$P = 1 - (1.1756 / 1.6048) \times 100 = \mathbf{26\%}$$

k) Número de partículas (N)

Se obtiene en función de d_v . Se calcula partiendo de la suposición que las partículas son esferas, el volumen sería $d_v^3 / 6$, y la masa (volumen x densidad) será $(d_v^3 \rho) / 6$ por partícula. Entonces el número de partículas por gramo se obtiene de la proporción:

$$\frac{(d_v^3 \rho) / 6 \text{ g}}{1 \text{ partícula}} = \frac{1 \text{ g}}{N}$$

$$N = \frac{6}{(d_v^3 \rho) / 6 \text{ g}}$$

$$N = 6 / (d_v^3 \cdot \rho) = 6 / [(425.3 \times 10^{-4} \text{ cm})^3 \cdot 1.6048 \text{ g/cm}^3] = \mathbf{15470 \text{ partículas por gramo}}$$

i) Superficie Específica por Cantidad de Masa.(Sw)

La superficie específica se calcula en función de d_{vs}

$$Sw = 6 / \rho \cdot d_{vs} = 6 / (1.6048 \times 473.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2) = \mathbf{78.93 \text{ cm}^2 / \text{g}}$$

j) Superficie específica por unidad de volumen (Sv)

$$Sv = 6 / dvs = 6 / 473.7 \times 10^{-4} \text{cm}^2 = \mathbf{126.66 \text{ cm}^2/\text{cm}^3}$$

2.6. Elaboración del Filtro.

El objetivo principal para el diseño básico el filtro, es lograr la estabilidad física de éste, lo cual, a su vez garantiza una remoción eficiente de hierro y manganeso.

El filtro esta formado por el lecho filtrante y el tanque aerador, los cuales trabajan uno después del otro. Los materiales filtrantes. Arena, lava volcánica, grava y pirolusita, están contenidos dentro de un tubo de acrílico de 12 cm de diámetro interno por 60.5 cm de altura y en el extremo superior un espacio libre de 5 cm por donde fluye el agua previamente aireada.

En la base del tubo se encuentra un agujero de salida de 15 mm de diámetro que está conectado con una pieza de cañería a la que se adaptó un grifo de media pulgada.

El tanque aerador es un recipiente ubicado sobre el filtro. Su finalidad es retener el agua (estando cerrada la válvula de salida del filtro) para ser tratada con la bomba de aire que proporciona las burbujas para oxigenar el agua. La bomba es eléctrica y lleva el aire por medio de una manguera hasta el fondo del tanque aerador y al final tiene un material difusor que permite la formación de burbujas más pequeñas con lo cual se mejora la oxigenación del agua.

Se trabajó primeramente con un tubo de 11.1 cm de diámetro y 48.5 cm de altura que tenía una

sección cónica en el área del tapón, cuya altura es de 4.5 cm de altura con su respectivo tapón al cual se le habían perforado varios agujeros pequeños para darle el efecto de regadera al agua que fluye hacia el filtro con la finalidad de no deformar el lecho filtrante. (Ver figura N° 10). Este tanque aereador facilitaría desarmar el filtro para hacer los cambios respectivos, así como también, tratar volúmenes pequeños de agua sin la necesidad de esperar un largo tiempo de aireación. Al final este tanque se cambiaría por un garrafón de 19 litros, que es un volumen más adecuado para suplir y obtener en una sola filtrada, la cantidad de agua necesaria para una casa por día. Para este tanque se requiere mayor tiempo de aireación. (ver figura N° 11).

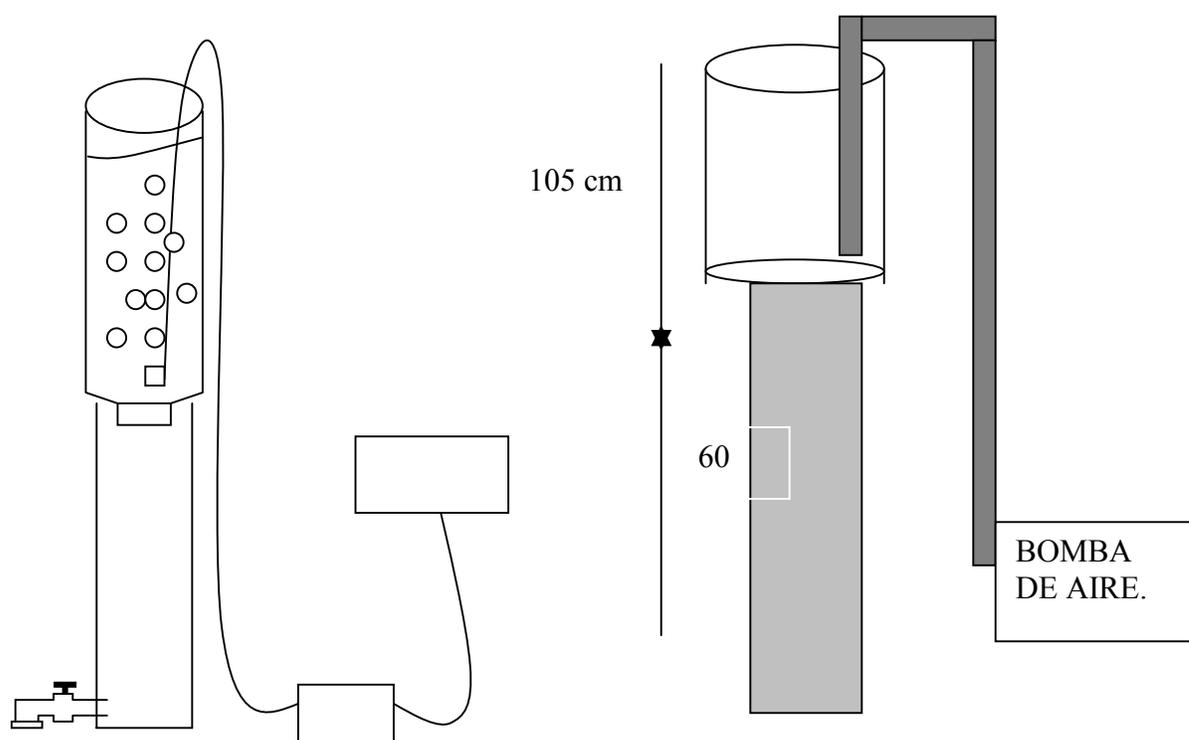


Figura 10: filtro con tanque

Aireador experimental

Figura 11: Esquema del diseño final del filtro con tanque aireador

A continuación se presentan las características fundamentales de cada filtro y las causas por las que se modificó su diseño.

Filtro N° 1.

El primer filtro tenía un soporte de grava de 3 cm de altura, sobre ésta, la capa de lava volcánica de 35 cm., una capa de pirolusita con una altura de 1 cm y por último en la parte superior una capa de 7 cm de arena.. En este filtro se dió una deformación de la capa de pirolusita, al pasarle una corriente de agua de chorro. Esto se debe a la finura de las partículas que presenta; éstas se mezclaron con la capa superior de arena, lo cual no es adecuado para el buen funcionamiento del filtro. (ver fig. 12)

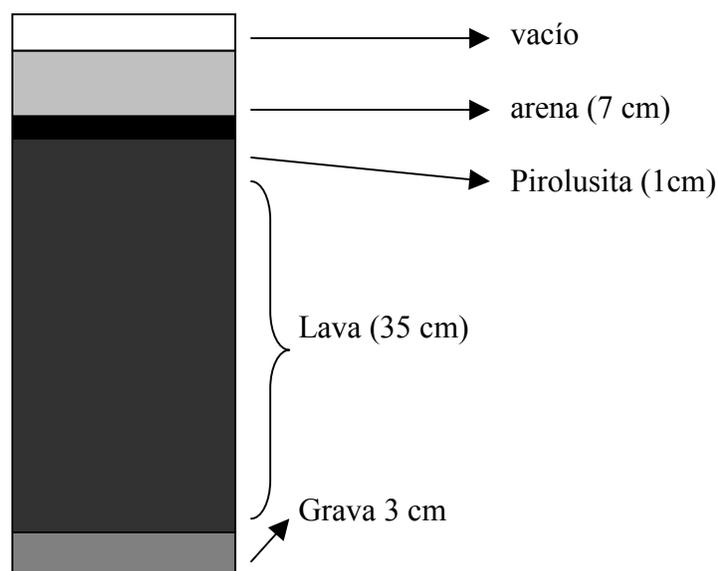


Figura 12: Diseño filtro #1

Filtro #2

El segundo filtro se modifica en lo correspondiente a la capa de pirolusita que se coloca 5 cm bajo la parte superior de la capa de lava, es decir, la capa de pirolusita entre la capa de lava. En este filtro se deforma la capa de pirolusita, al pasarle una corriente de agua de chorro, debido al arrastre que provoca; por esta razón se procedió a colocarla aún más abajo. (Ver fig. N° 13)

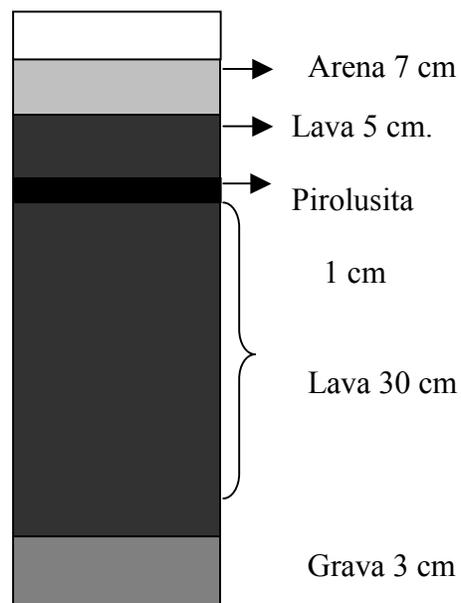


Fig. N°. 13

Filtro # 3:

Se modificó también en cuanto a la capa de pirolusita, se puso 15 cm bajo la parte superior de la capa de lava, para que el agua pasara a una menor velocidad por la capa de pirolusita, sin embargo también se deformó. La deformación de la capa de pirolusita, se evidenció por la salida de agua turbia con coloración negruzca. (Ver figura N° 14)

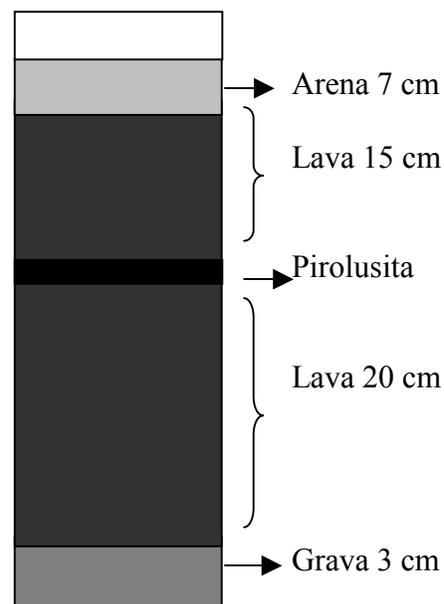


Figura N°. 14

Filtro # 4

Se procede a colocar 2 capas de pirolusita, ambas de 1 cm de altura con la diferencia que estarán sobre capas de lava A (lava volcánica de menor tamaño de partícula, con un diámetro de entre 0.15 y 0.25 mm). La primera capa de pirolusita, se colocó 10 cm bajo la capa de Lava B (de tamaño 0.25 -0.60 mm) y la segunda se coloca 10 cm bajo el estrato de lava volcánica. Este filtro mostró una mayor estabilidad en las capas de pirolusita, lo cual asegura la remoción de manganeso. (Ver fig. 15)

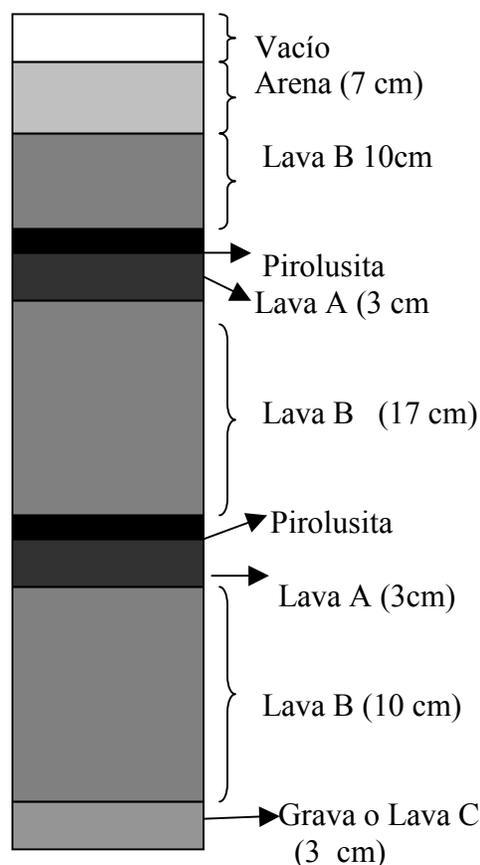


Fig. N° 15. Esquema del cuarto filtro

Filtro #5

Una vez lograda la estabilidad física de las capas del lecho filtrante, se procede a incluir accesorios al diseño del filtro 4, necesarios para una mejor operación del filtro. Para el diseño final del filtro se coloca una porción de algodón para que no deje pasar los materiales filtrantes que pasaban por la malla anteriormente colocada y de esta manera poder evidenciar pérdidas

de pirolusita por ennegrecimiento del algodón. Además se cambia la grava por lava volcánica del tamaño de 0.60 a 1.70 mm de diámetro, (denominada lava C) que procede de los denominados gruesos durante el proceso de tamizado de la lava en la preparación de la misma; esto con el objetivo de reducir costos de construcción. En la construcción de este filtro se mide la cantidad de agua que alojaba el lecho filtrante. Para este diseño, la cantidad de agua intersticial es de 2100 ml. Esto se determinó midiendo el agua que se iba agregando al material seco durante la construcción del lecho filtrante y servirá más adelante para saber cuánta agua se debe dejar pasar antes de tomar la muestra para un análisis.(ver fig. 16)

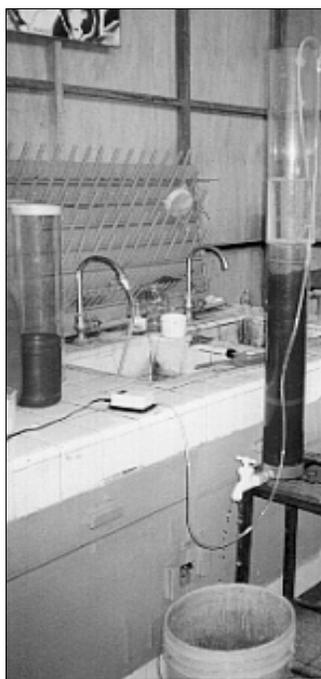


Figura N°. 16. Diseño final del filtro

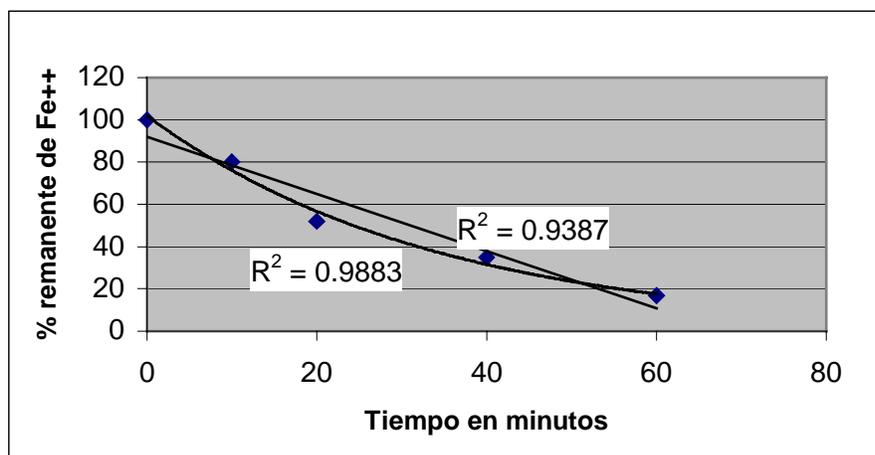
2.7. Determinación del Tiempo de Aereación.

El tiempo de aereación es una variable determinante en el proceso, ya que en esta etapa se da la oxidación de los metales; se determina experimentalmente midiendo la oxidación de una solución de hierro ferroso estándar con una concentración inicial de 1.5 ppm, luego esa se empieza a aerear y se toman muestras cada 10 minutos para determinar el hierro ferroso a ese tiempo de aereación.

El hierro ferroso se determina de la siguiente manera: se miden 10 ml del amortiguador de acetato y 2 ml de fenantrolina en un frasco volumétrico de 50 ml. Luego se agrega una muestra de 25 ml del estándar. De esta manera se determinó la concentración inicial de Fe^{+2} , luego a los 10, 20, 30, 40, 50, 60 minutos de aereación. Estas mediciones se hicieron a 30°C , lo cual tiene influencia en la solubilidad del oxígeno. En este experimento se observa que el color de la solución disminuye con el tiempo de aereación que tiene la muestra obviamente debido a la oxidación de Fe^{+2} a Fe^{+3} . Como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 7: Concentración de hierro ferroso respecto al tiempo de aireación.

TIEMPO	[] Fe ⁺² ppm	% oxidación	% remanente Fe ⁺²
Inicial	1.50	0	100%
10 minutos	1.20	20%	80%
20 minutos	0.75	50%	50%
30 minutos	0.68	55%	45%
40 minutos	0.53	65%	35 %
50 minutos	0.32	79%	21%
60 minutos	0.25	83.3%	16.7%

Gráfico No 1. Oxidación de Fe⁺² a Fe⁺³ por aireación.

(11) En esta gráfica, puede observarse que el comportamiento de la oxidación del Fe⁺² es más como una ecuación exponencial que como una línea recta, esto se evidencia por los valores del

factor de correlación de cada una. Posteriormente se procedió a extender la gráfica anterior siguiendo la misma ecuación para determinar el tiempo más adecuado de aereación.

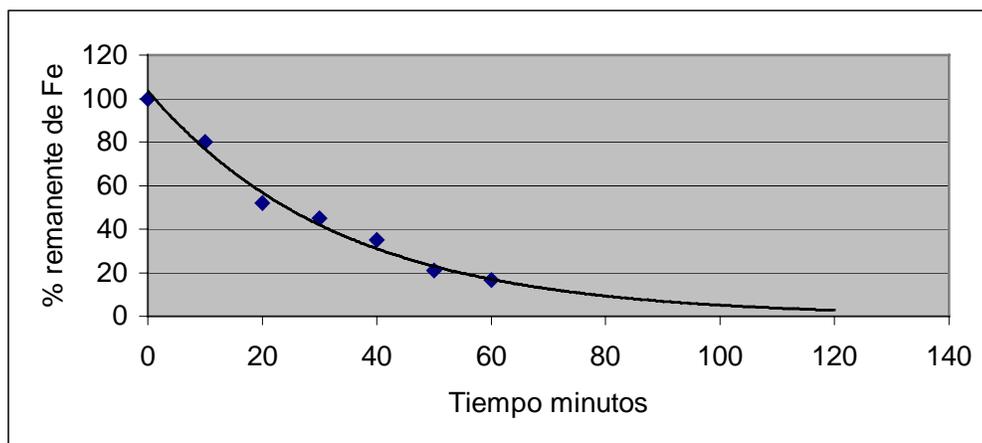


Gráfico N° 2. Extrapolación de la gráfica anterior

En esta gráfica, la oxidación entre el minuto 60 y 80 todavía es considerable. Del minuto 80 al 100 se reduce notablemente y del minuto 100 al 120, es muy poco lo que se oxida de hierro. De aquí se concluye que el tiempo de aereación debía ser de 90 minutos, ya que a este tiempo se tiene casi un 95 % de oxidación y para conseguir la oxidación del restante 5 % debe pasar demasiado tiempo.

Debemos tener en cuenta que el sistema de aereación es una bomba que trabaja a una velocidad de 2 litros de aire por minuto; el tanque aereador tiene una capacidad de 4 litros y la concentración inicial de hierro fué de 1.5 ppm. A partir de estos datos experimentales podemos obtener tiempos de aereación para otros sistemas que trabajen por difusión de aire en agua. Así tenemos que para 6 mg de hierro que hay en el tanque ($1.5 \text{ mg/L} \times 4 \text{ l}$), se

necesitaron 180 litros de aire. Así, para el tanque de 19 litros se necesitará una bomba de mayor capacidad de flujo para disminuir el tiempo de aireación.

Tabla N° 8. Tiempos de aereación propuestos para diferentes concentraciones de hierro.

[] Fe	mg de Fe en 19 L	Litros de aire	Tiempo de aireación con una bomba de 2 L/min	Tiempo de aireación con una bomba de 4 L /min
0.5 ppm	9.5	285	142.5 min	71.25 min
1 ppm	19.0	570	285.0 min	142.50 min
1.5 ppm	28.5	855	427.5 min	285.00 min

3. Determinación de la Eficiencia del Filtro.

La eficiencia del filtro está determinada primordialmente por el porcentaje de remoción de hierro y manganeso en el agua, por lo que las variables como el tiempo de aereación y el diseño cambian con esa finalidad. Se toman estos resultados para el cálculo de porcentaje de remoción. Los valores de eliminación obtenidos para el filtro # 5 son los siguientes: 96.88 % de hierro como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y 99 % de manganeso como $\text{Mn}(\text{OH})_2$ esta determinación se realizo con una solución patrón tanto para el hierro como para el manganeso, las cuales contenían 10 ppm de hierro y 5 ppm de manganeso. (Ver anexo # 10, 11). La muestra de agua filtrada se toma después de haber dejado fluir 2.5 litros que corresponden al agua

intersticial del filtro. Se evalúan otros parámetros para garantizar la potabilidad del agua como: temperatura, potencial de hidrógeno, sabor, olor, color, turbidez y residuo total. Cada una de estas determinaciones se realizan directamente en el agua de la muestra cruda y posteriormente en el agua filtrada de las muestras de los lugares elegidos. Los métodos utilizados en las determinaciones mencionadas son los siguientes:

3.1. Análisis de Manganeso por el Método del Persulfato.

La oxidación de los compuestos manganosos solubles, por la acción de persulfato, a la forma de permanganato, se verifica en presencia del nitrato de plata, bajo las condiciones que Nidahl demostró que eran más efectivas. El color resultante es estable, cuando menos por unas 24 horas, si no se tiene materia orgánica.

Se evita la interferencia que puedan producir cantidades como 0.1 g de cloruro de sodio, por la adición del sulfato mercúrico que forma complejos poco disociados. Solamente pueden estar presentes cantidades pequeñísimas de bromuro y yoduro. Pueden estar presentes cantidades razonables de materia orgánica, si se aumenta el período de calentamiento y si se agrega exceso de persulfato. La concentración mínima determinable es: 0.005 mg de Mn.

Para el análisis de manganeso, se toma una muestra de 100 ml de agua, luego se agrega 5 ml de solución especial (reactivo que contiene 75 g de sulfato mercúrico en 400 ml de ácido nítrico concentrado, 200 ml de agua, 200 ml de ácido fosfórico al 85 % y 0.035 g de nitrato de plata, diluyéndose a un litro la solución fría) se concentra por ebullición a 90 ml. Se agrega 1 g

de persulfato de amonio y se lleva a ebullición, en unos 2 minutos, sobre una flama; no se ha de calentar en baño maría. Se retira de la flama por un minuto y se enfría bajo chorro de agua.

(Una ebullición demasiada prolongada da lugar a la descomposición del exceso de persulfato y a pérdidas subsecuentes en el color del permanganato; un enfriamiento demasiado lento tiene el mismo efecto.) Se diluye a 100 ml con agua destilada libre de sustancias reductoras y se mezcla. Se compara visual o fotométricamente con patrones que contengan de 0, a 0.005, mg, a 1.5 mg de Mn que se preparan tratando las cantidades debidas de la solución patrón de Mn en la misma forma. Las mediciones fotométricas se practican contra un testigo de agua destilada en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 525 nanómetros. En el rango de 0.05 a 1.5 mg de Mn, en ausencia de sustancias interferentes, el error relativo es generalmente de no más del 1%, siendo más alto para las cantidades de Mn más bajas. La concentración mínima determinable es de 0.005 mg. Se evita la interferencia que pueden producir cantidades como 0.1 g de cloruro de sodio, por la adición del sulfato mercúrico. Solamente pueden estar presentes cantidades pequeñísimas de bromuro y yoduro.

Se preparó una curva de calibración con soluciones de 0.1, 0.3, 0.9, 1.1, 1.3 y 1.5 ppm preparadas a partir de la solución madre de 50 ppm.

La solución madre se prepara disolviendo 1.8 g de KMnO_4 en unos 450 ml de agua destilada, contenida en un matraz cónico de 1 litro, y se calienta por 4-5 horas a 70° - 80°C , protegiendo la boca del matraz de la entrada de polvo. Se filtra aun caliente a través de vidrio poroso, lana de vidrio o filtro de asbesto, y el filtrado se recoge en un matraz cuidadosamente limpio. Se

pasa el filtrado a un matraz aforado de 500 ml se agregan 2 ml de H_2SO_4 , se enfría a la temperatura ambiente y se diluye hasta el aforo con agua destilada.

Dentro de las 24 horas inmediatas se titula esta solución de KMnO_4 oxidimétricamente con oxalato de sodio.

La *solución patrón de sulfato manganoso*: se prepara en la forma usual una solución de KMnO_4 0.1 N, disolviendo 3.2 g de KMnO_4 en agua destilada y diluyendo a un litro. Esta solución se debe añejar por varias semanas a la luz del sol o calentarse cerca del punto de ebullición por varias horas, a continuación se filtra a través de un filtro de vidrio poroso o algodón. Se calcula el volumen de esta solución que se necesita para un litro del patrón, de una concentración de 1 ml = 0.050 mg de Mn, por la fórmula: $\text{ml de KMnO}_4 = 4.55 / \text{normalidad}$ exacta del KMnO_4 preparado

A este volumen se le agregan 2 a 3 ml de ácido sulfúrico concentrado y a continuación solución de bisulfito de sodio 1 en 10 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 1000 ml con agua destilada. (10)

Esquema de Preparación de la curva de Calibración

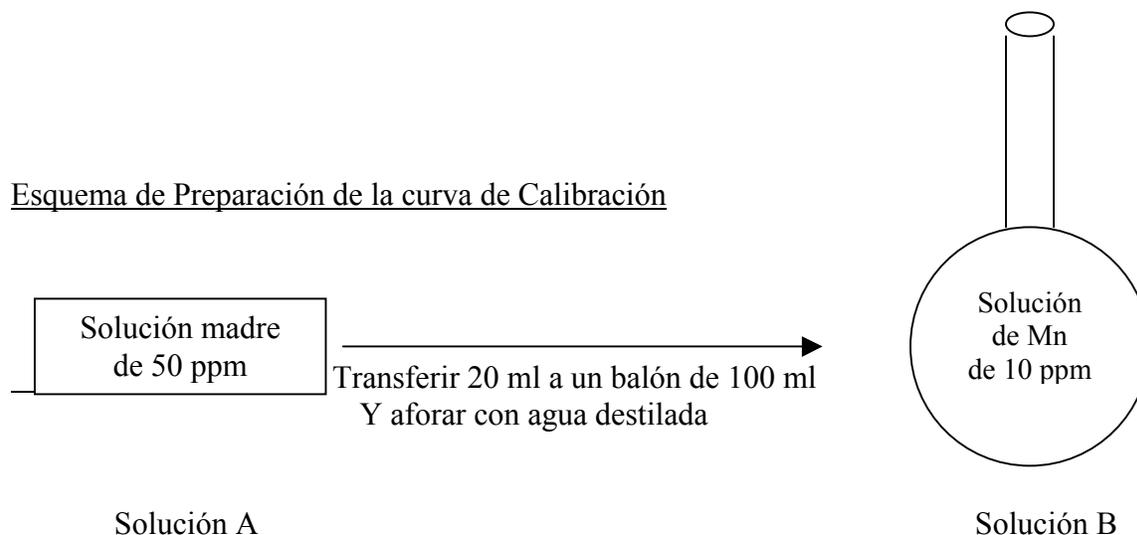


Tabla No 9. Preparación de curva estándar para Manganeso.

1)	tomar 1 ml de solución B	y llevar a 100 ml en balón volumétrico	0.1ppm
2)	tomar 3 ml de solución B	y llevar a 100 ml en balón volumétrico	0.3ppm
3)	tomar 9 ml de solución B	y llevar a 100 ml en balón volumétrico	0.9ppm
4)	tomar 11 ml de solución B	y llevar a 100 ml en balón volumétrico	1.1ppm
5)	tomar 13 ml de solución B	y llevar a 100 ml en balón volumétrico	1.3ppm
6)	tomar 15 ml de solución B	y llevar a 100 ml en balón volumétrico	1.5ppm

3.2. Análisis del Hierro Total por el Método de la Fenantrolina.

El hierro se disuelve y se reduce al estado ferroso por ebullición con ácido e hidróxilamina, haciéndose reaccionar posteriormente con 1,10-fenantrolina a valores de pH de 3.2 a 3.3. Tres moléculas de fenantrolina forman un quelato con cada átomo de hierro ferroso para dar lugar a

un complejo rojo-anaranjado. La solución colorida obedece a la ley de Beer, la intensidad del color es independiente del pH, en el ámbito de 3 a 9 y es estable cuando menos por 6 meses.

Se logra un rápido desarrollo del color, en presencia de un exceso de fenantrolina, a un pH entre 2.9 y 3.5.

Para el análisis de hierro total, se mezcla cuidadosamente la muestra y se miden 50 ml en un matraz de 125 ml (si la muestra contiene más de 2 ppm de Fe se mide con exactitud una alícuota que no contenga más de 0.1 mg, que se diluye a 50 ml; también se puede usar más fenantrolina y un trayecto de luz de 1 ó 2 cm). Se agregan 2 ml de HCl concentrado y 1 ml de reactivo de hidróxilamina. Se agregan unas cuantas perlas de vidrio y se calienta a ebullición para tener la seguridad de la disolución de todo el hierro, se continúa la ebullición hasta que el volumen se haya reducido a 15 o 20 ml. Se enfría a la temperatura ambiente y se pasa a un matraz aforado de 50 ml. Se agregan 10 ml de 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 por 10-15 minutos, para lograr el máximo desarrollo de color. Para mediciones fotométricas, los patrones se deben leer a una longitud de onda de 510 nanómetros ajustando al 100% de transmitancia (absorbancia cero) con agua destilada en un espectrofotómetro. Se pueden determinar directamente concentraciones de hierro, bien sea disuelto, total o ferroso, entre 0.02 y 4 mg/L. Entre los iones interferentes se encuentran los fosfatos, el cromo, el cinc en concentraciones que excedan 10 veces la del hierro; el cobalto en exceso de 5 mg/L, el níquel en exceso de 2 mg/L, el bismuto, el cadmio, la plata, el mercurio y el molibdato, que se

precipitan con la fenantrolina. La ebullición inicial con ácido revierte los polifosfatos a ortofosfatos y elimina nitritos y cianuros que interferirían en otra forma. La adición de exceso de hidroxilamina elimina los errores que se pudieran derivar de concentraciones excesivas de sustancias intensamente oxidantes.

Se preparó una curva de calibración con soluciones de 0.1, 0.3, 0.9, 1.1, 1.3 y 1.5 ppm preparadas a partir de la solución madre de 100 ppm.

La *solución madre de hierro*, se preparó con sulfato de hierro amoniacal. Se agregan lentamente 20 ml de H_2SO_4 concentrado a 50 ml de agua destilada y se disuelven 0.7022 g de $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$. Se agrega a gotas $KMnO_4$ 0.1 N hasta que persista un débil color rosa. Se diluye hasta 1000 ml con agua destilada exenta de hierro y se mezcla. Esta solución madre contiene 0.10mg de Fe por 1.00 ml.(10)

Esquema de Preparación de la curva de Calibración:

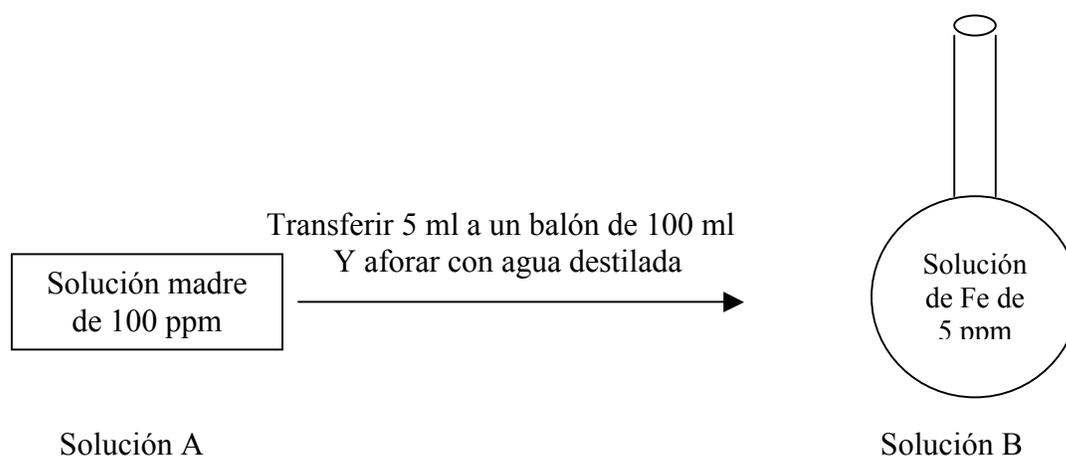


Tabla No 10. Preparación de curva estándar para Hierro.

1)	tomar 1 ml de solución B y llevar a 50 ml en balón volumétrico	0.1ppm
2)	tomar 3 ml de solución B y llevar a 50 ml en balón volumétrico	0.3ppm
3)	tomar 7 ml de solución B y llevar a 50 ml en balón volumétrico	0.7 ppm
4)	tomar 9 ml de solución B y llevar a 50 ml en balón volumétrico	0.9ppm
5)	tomar 11 ml de solución B y llevar a 50 ml en balón volumétrico	1.1ppm
6)	tomar 13 ml de solución B y llevar a 50 ml en balón volumétrico	1.3ppm
7)	tomar 15 ml de solución B y llevar a 50 ml en balón volumétrico	1.5ppm

Tablas y curvas de calibración elaboradas por los métodos anteriores para los minerales en estudio.

Para el Manganeso.

[]	Abs
0.1	0.003
0.3	0.012
0.7	0.03
0.9	0.039
1.1	0.049
1.3	0.054
1.5	0.06

Tabla No. 11. Concentración Vrs. Absorbancia para manganeso

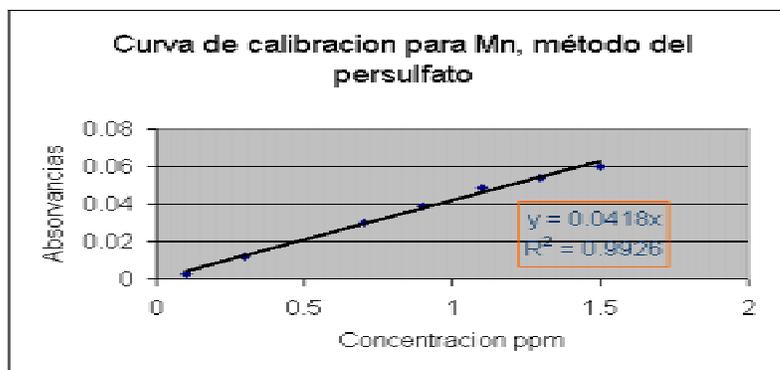


Gráfico N° 3: Curva de calibración para Manganeso.

Se obtienen las absorbancias con las que se elabora la curva de calibración en la cual, la ecuación de regresión obtenida que fue: $Y = 0.0418 X$, donde Y es absorbancia y X es concentración. $r = 0.9963$ $R^2 = 0.9926$

Para el Hierro.

[]	Abs
0.1	0.026
0.3	0.064
0.9	0.161
1.1	0.196
1.3	0.24
1.5	0.294

Tabla No. 12. Concentración Vrs. Absorbancia para el hierro.

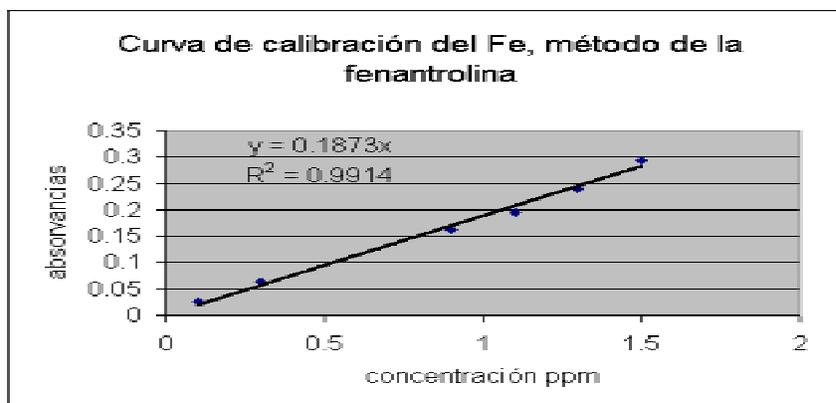


Grafico N° 4. Curva de calibración para el hierro.

Se obtienen las absorbancias con las que se elabora la curva de calibración en la cual, a ecuación de regresión obtenida que fue: $Y = 0.1873 X$, donde Y es absorbancia y X es concentración. $r = 0.9957$ $R^2 = 0.9914$.

Donde r expresa la fuerza o intensidad con que están unidas las variables y r^2 la proporción de varianza cuando r^2 se aleja de 0 implica que existe un grado mayor de asociación entre las variables.

3.3. Determinación de temperatura.

Normalmente las determinaciones de temperatura se practican con cualquier termómetro de mercurio. De escala centígrada de cualquier clase, (como los termómetros patrón certificados por el National Bureau of Standards de los Estados Unidos). Las lecturas se deben hacer con el

termómetro sumergido en el agua, de preferencia en movimiento, después de un tiempo suficiente para lograr lecturas constantes.

La temperatura del agua en el punto de muestreo se debe expresar en grados centígrados, aproximando a grados enteros o fracciones, según precisión requerida.

Para el caso es importante la toma de la temperatura ya que da una referencia del cambio de ella entre el lugar de muestreo y el lugar de análisis. (10)

3.4. Determinación de Potencial de Hidrógeno.

Es una determinación potenciométrica en el que se usa un electrodo de cristal en combinación con el potencial de referencia proporcionado por un electrodo de calomel saturado. El electrodo de cristal y el electrodo de calomel se deben humedecer y preparar para su uso, de acuerdo con las instrucciones que se proporcionen.

El instrumento se puede normalizar con una solución amortiguadora cuyo pH sea vecino al de la muestra, y cuando menos, se debe comprobar la respuesta lineal del electrodo, con otra solución amortiguadora de pH diferente. Las lecturas con las soluciones amortiguadoras adicionales dan una idea tosca de los límites de exactitud que se pueden esperar con el instrumento y con la técnica de operación.

3.5. Determinación del Sabor y Olor.

El agua, se puede identificar sabor por las sales inorgánicas disueltas del hierro, zinc, manganeso, cobre, sodio y potasio. Como estos sabores no están acompañados de olores, se debe aplicar la prueba de sabor cuando se trata de ellos.

Los olores ocurren en el agua debido a la presencia de sustancias extrañas generalmente orgánicas, aunque también producen olor algunas inorgánicas como el H₂S.

Las pruebas de sabor y olor son útiles como una comprobación de la calidad del agua cruda y del agua tratada y se verifica contra un blanco de “agua inodora” que se produce por medio de un generador de agua inodora que consiste en un frasco de 4 L que contiene grava con un tamaño de 1.18 a 2.36 mm (correspondiente a la que pasa el tamiz # 16 y se retiene en el # 8) en una altura de 25 mm, sobre esta, se coloca carbón activado granular de 4 x 10 mallas hasta el cuello del frasco, sobre esta, se coloca lana de vidrio y se tapa con un tapón de hule de 2 agujeros para las varillas de vidrio hueco para la entrada y la salida del agua. La varilla de entrada baja hasta el fondo del frasco y la de salida baja hasta donde se encuentra la lana de vidrio. (Ver figura N°. 17)



Figura 17: Generador de agua inodora

3.6. Procedimiento para determinación de olor.

Se agitan 200 ml de la muestra contenida en el matraz erlenmeyer de 500 ml de tapón esmerilado que previamente se haya llevado a 60°C. Se olfatea ligeramente y se registra su descripción según el cuadro o con algún otro término que mejor identifique el olor.

Procedimiento para determinación de sabor: se prueba el sabor de la muestra a 40°C tomando en la boca unos 10 a 15 ml manteniéndolos por unos cuantos segundos y escupiéndolos.

Si se percibe olor o sabor en los 200 ml de muestra, se hacen diluciones de la muestra con “agua inodora” para determinar el número incipiente; que se define como, la relación de dilución (con respecto a los 200 ml de muestra total) en el cual es a penas perceptible el sabor y el olor. Así, si se usa un volumen diferente de 200 el número de olor incipiente se calcula por:

$$\text{Número incipiente} = \frac{\text{Vol. De mx.} + \text{Vol. de agua inodora}}{\text{Vol. de mx.}}$$

Vol. de mx.

El valor máximo admisible de número incipiente para sabor es de 1 y la de olor es de 3. (Ver anexo 4). Por esta razón se simplificará el procedimiento de manera que solo se busque verificar si se cumple la norma. Por lo tanto si en la muestra de 200 ml no se percibe sabor, el número incipiente será menor de 1 y se reportara como “no rechazable” (N.R). En caso que se perciba olor, se harán diluciones tomando 140, 100 y 70 ml de muestra las cuales se llevarán a 200 con agua inodora. Si en la última todavía se percibe olor, no se harán más diluciones debido a que ya está fuera de la norma: (ver anexo N° 4)

- Número de olor incipiente para una muestra de 140 ml: $140 + 60 = 1.4$

En la que se percibe olor 140 ml

- Número de olor incipiente para una muestra de 100 ml: $100 + 100 = 2$

En la que se percibe olor. 100 ml

- Número de olor incipiente para una muestra de 70 ml: $70 + 130 = 3$

En la que se percibe olor 70 ml

En esta determinación se debe diferenciar lo que es el color verdadero y el color aparente. El término color aparente no incluye únicamente el debido a las sustancias en solución sino también el atribuible a sustancias en suspensión. El término color verdadero es el que se determina cuando previamente se ha eliminado toda turbiedad por un método apropiado de centrifugación. El color se determina por comparación visual de la muestra con soluciones coloridas de concentración conocida. El método normal para la medición de color es el del

Platino – Cobalto, en el cual la unidad de color es la producida por una solución de 1 mg / l de Pt en la forma del ion cloroplatinato. Se preparan patrones que tengan 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70 unidades en tubos Nessler de 50 ml.(10)

El color de la muestra se debe observar llenando hasta el aforo con el agua en examen un tubo Nessler de 50 ml. Y comparándolo con los patrones. La observación se debe verificar mirando verticalmente hacia abajo a través de los tubos contra una superficie blanca. Si el color excede de 70 unidades se diluye la muestra con agua destilada en proporciones conocidas hasta que el color caiga dentro del ámbito de los patrones multiplicando los resultados por el factor de dilución adecuado. Los resultados de las determinaciones de color se deben expresar en números enteros, aproximando en la forma siguiente

Unidades de color	Aproxímense las ultimas cifras a
1 - 50	1
51 - 100	5
101 - 250	10
251 - 500	20

3.7. Turbidez.

La turbiedad del agua se debe a la presencia de sólidos suspendidos, tales como arcilla, limos, materia orgánica finamente dividida y microorganismos. Se debe entender claramente que la turbiedad es una expresión de la propiedad óptica de una muestra, que hace que los rayos luminosos se dispersen y se absorban en lugar que se transmitan en línea recta a través de ella.

La turbiedad se determinará por medio de un fotómetro (el SQ118 Merck) en el modo de nefalómetro que mide la turbiedad en unidades nefalométricas. (10)

3.8. Residuo Total.

La muestra se evapora en una cápsula tarada sobre baño de vapor y se seca a peso constante, bien sea a 103 °- 105°C o a 179°- °C. El aumento en peso sobre el de la cápsula vacía representa el residuo total.

La cápsula que se destine a la determinación del residuo total debe someterse a un secado preliminar en estufa, a la misma temperatura que se intenta aplicar al residuo. Si se va a calcinar el residuo, para la determinación del residuo total fijo, se necesita que la cápsula se calcine previamente en mufla, a 600 °C por 30 minutos.

Se selecciona un volumen de muestra que rinda entre 25 y 250 mg de residuo, y de preferencia entre 100 y 250 mg por lo general, basta un cálculo preliminar tosco, a partir del valor de la conductancia específica para estimar el volumen a evaporar.

Se vierte una porción medida de la muestra en una cápsula de evaporación tarada, colocada sobre un baño de vapor. Después de que se ha terminado la evaporación del agua, se pasa la cápsula a una estufa mantenida a 103°-105°C secándose hasta peso constante. Se considera peso constante, entre dos series sucesivas de operaciones consistentes en calentamiento, enfriamiento en desecador y pesada, no ocurre un cambio en peso mayor de 0.5 mg. El secado por un periodo prolongado puede eliminar la necesidad de comprobar el peso constante para lo cual el analizador puede optar entre secar la cápsula durante la noche o determinar por tanteos cual es el tiempo mínimo requerido para lograr un peso constante con un tipo determinado de muestra.(10)

Se pesa la cápsula tan pronto como se enfrié completamente. Los residuos deben permanecer largo tiempo en el desecador, pues muchos de ellos en especial los que se secan a 180°C, son muy higroscópicos y pueden absorber agua de un desecante que no este completamente seco. El aumento de peso se reporta como “residuo total por secado a..... °C”, en terminas mg/L y aproximando al numero entero mas próximo. Para aquellos resultados que exceden de 1000 mg/L solo se reportan tres cifras significativas.

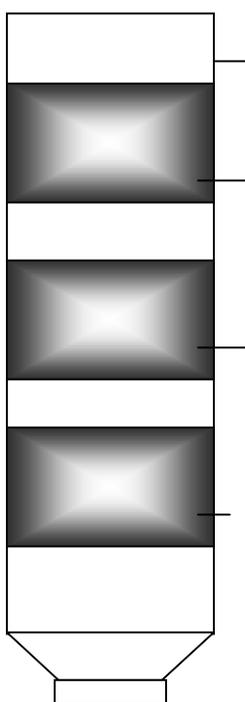
El cálculo se obtiene de la siguiente formula:

$$\text{Mg/L} = (\text{mg de residuo total} \times 1000 / \text{ml de muestra}).$$

4. Cálculo del Flujo de la Corriente de Agua.

Este cálculo se realizó al diseño final del filtro. Se observó que el caudal de salida era variable a medida que el aereador se iba vaciando, esto se debe al efecto de la presión hidrostática que va disminuyendo a medida que el volumen de agua disminuye. De esto se concluye que el caudal de salida es proporcional al volumen de agua en el aereador y específicamente a la altura. Se hicieron mediciones del tiempo que tarda en salir un litro de agua filtrada. A partir de esto se observó que el caudal de salida no se mantenía constante. El caudal de salida está en relación con el tiempo de contacto del agua con el lecho filtrante, ya que a mayor caudal de salida, menor tiempo de retención en el lecho filtrante y por lo tanto menor porcentaje de remoción de los metales en estudio.

También se observa que en el proceso de maduramiento del lecho filtrante, el caudal de salida disminuye. Esto se debe a que los óxidos de hierro y manganeso que se van formando se van depositando en las porosidades de la lava, además se forma una cubierta de microorganismos denominada Zooglea que contribuye a disminuir el flujo de filtración por lo que disminuye aún más los espacios vacíos. Ver tablas N°. 13 A y B:



El aereador tiene una altura de 48.5 cm de altura y 111 mm de diámetro. La boquilla, por su forma cónica, no permitiría hacer una medición más precisa del tiempo de salida del agua. Se designan 3 secciones del tubo aereador para hacer las mediciones del flujo de salida, con el objetivo de que tuvieran la misma altura y presión hidrostática. Estas secciones se marcan en el tubo aereador para 1 litro de agua según el esquema. Como ya se dijo, el tubo tenía una capacidad de poco más de 4 litros.

Fig. N° 19. Esquema del aereador

Tabla No.13. A: Tiempo de salida de 1 litro de agua a distintas alturas del tanque aereador (‘min ‘’seg)

Fecha	Parte alta del aireador	Parte media	Parte baja
Mediciones del día 1 de febrero	1'16''/1	1'25''/1	1'46''/1
	1'18''/1	1'26''/1	1'51''/1
	1'12''/1	1'24''/1	1'37''/1

Tabla No.13. B: Tiempo de salida de 1 litro de agua a distintas alturas del tanque aereador (‘min ‘’seg)

Fecha	Parte alta del aireador	Parte media	Parte baja
Mediciones del día 5 de febrero	1'14''	1'31''	1'50''
	1'20''	1'34''	1'51''
	1'18''	1'40''	1'46''
Mediciones del día 9 de febrero	1'26''	1'42''	1'57''
	1'20''	1'44''	1'55''
	1'24''	1'46''	1'55''
Mediciones del día 12 de febrero	1'33''	1'50''	2'5''
	1'28''	1'52''	2'8''
	1'30''	1'53''	2'7''

A partir de las mediciones se determina una media para el caudal de salida cuando las mediciones eran reproducibles según la última tabla. Para determinar esta media, se mide el tiempo total que tarda en vaciarse el aereador con capacidad de 4 litros, este tiempo es de 6 minutos con 30 segundos, obteniendo por conversión un caudal de 36.92 L / hora. Para los filtros, el caudal se mide en $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{unidad de tiempo}$, ya que es una magnitud que toma en cuenta el diámetro del lecho filtrante. Si tomamos el caudal medio de 36.92 L / hora y el diámetro del filtro de 92 mm, tendríamos un “caudal por área de salida” de $3.14 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hora}$. Tenemos que para filtros lentos, este caudal debe estar entre 0.78 y $3.75 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hora}$. (11)

5. Elección de la Solución de Lavado.

Se ensayaron cuatro soluciones de lavado, con un volumen de 4 litros (la cantidad de agua intersticial es de 2.1 litro) las cuales se detallan a continuación:

- Ácido clorhídrico 0.1 N
- Hidróxido de Sodio 0.1 N
- Hipoclorito de sodio 2.5 % de cloro libre. (Lejía y agua a partes iguales. pH 12)
- Silicato de sodio.56.6° Baumé. 15 ml por 4 litros de agua pH 12

Tabla N° 14: Ventajas y Desventajas de las Diferentes Soluciones de Lavado

	Ventajas	Desventajas
Ácido Clorhídrico	La reacción de disolución de los hidróxidos es más rápida. El tiempo de permanencia es de una hora. Solo se necesitaron 4 litros de agua para eliminar los remanentes de ácido.	Es un reactivo peligroso debe tenerse cuidado al manipularlo.
Hidróxido de sodio	La reacción de disolución es favorable ya que se disuelven los hidróxidos de hierro. Se necesita un tiempo de permanencia de 1 día.	El tiempo de permanencia en el filtro es muy largo.
Silicato de sodio	La reacción de disolución es la más rápida de todas. Se necesita de un tiempo de permanencia de 3 horas	Alto costo del reactivo
Hipoclorito de sodio	Fácil preparación manipulación y bajo costo. Efecto desinfectante	Necesita 40 litros de agua de lavado para eliminar el sabor que este le proporciona al agua.

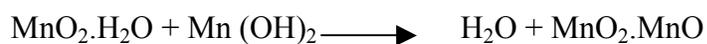
El procedimiento para el lavado o regeneración de la lava es con el objetivo de devolverle a la lava su capacidad filtrante, es decir, librarla del hierro y manganeso que estaba retenido.

Esto se logra gracias a que los compuestos silicoaluminicos son bases permutables que significa que pueden volver a sustituir uno de sus iones por medio de un lavado adecuado con una solución que contenga el ion que fue intercambiado durante la óxido/reducción.

Esta operación se realizó agregando directamente al tanque aereador los 4 litros de la solución de lavado y posteriormente se abría la válvula de salida para sacar el agua que retenía el filtro, se midió el volumen, hasta sacar 2.1 litros de agua, luego se cerraba la válvula. De esta manera se aseguraba que la solución de lavado estuviera en contacto directo con el lecho filtrante, la eficacia del lavado era evidenciada por el cambio de color en el agua de lavado lo cual corresponde a las altas concentraciones de hierro y manganeso que se habían arrastrado. Se abría la válvula y se observaba si el agua había cambiado de color, si no había cambiado, se cerraba nuevamente y se dejaba más tiempo.

La solución de lavado que proporciona mejores resultados es el ácido clorhídrico 0.1 N debido a su bajo costo, su rápida acción, y su fácil eliminación.

También se recomienda, hacer anualmente un lavado con solución de permanganato de potasio 0.1 N para regenerar la pirolusita como se presenta en las siguientes reacciones:



El MnO_2 en contacto con el agua, se hidrata y reacciona con las sales manganosas formando manganito mangánico el cual puede ser oxidado por el permanganato para formar nuevamente la pirolusita. (4)

6. Determinación del Tiempo de Vida Útil.

El tiempo de vida útil de un filtro se define por la caída de presión que este sufre, cuando los espacios intersticiales se han saturado, ya que se han retenido gran cantidad de los minerales. De acuerdo a esto una persona puede saber que su filtro no está eliminando los minerales, cuando el tiempo de retención del agua dentro del filtro aumente, y por lo tanto se hace necesario un lavado o regeneración del lecho filtrante. En este sentido, la vida útil va a depender de las concentraciones de hierro y manganeso que contengan las aguas que se van a tratar. Para esto resulta de gran importancia conocer cuántos mg de hierro y manganeso puede retener el filtro sin que se reduzca considerablemente el porcentaje de remoción del agua tratada. La única forma de realizar esta tarea es, filtrar grandes volúmenes de agua de concentración conocida y analizar la concentración de hierro y manganeso a la salida, para poder determinar en qué momento el porcentaje de remoción era muy bajo. Esta tarea no se realizó, por el inconveniente que representa determinar concentraciones a la entrada y a la salida del filtro durante un tiempo indeterminadamente largo. Por esta razón se realizó una estimación de la capacidad de retención de hierro y manganeso del lecho filtrante. Para esto, se determinó el espacio vacío disponible en el lecho filtrante. Recordemos que el lecho filtrante esta formado por 3 tipos de lava de diferente tamaño y que sólo de una de ellas (la que se

encuentra en mayor proporción) tenemos su análisis granulométrico, Si nos referimos a la lava B, esta tiene 26 % de porosidad; es decir, que de los 2460 cm³ que se tienen en el filtro (37 cm de altura por 9.2 cm de diámetro) 640 cm³ son espacio vacío, si a esto sumamos los espacios vacíos correspondientes a la lava A, lava C, y arena, sería aún más el espacio vacío disponible para depositarse el hierro y el manganeso. Obviamente no se esperará que el filtro esté saturado para realizar el lavado, por esta razón, consideramos que el tiempo justo para realizar el lavado es cuando el lecho está a un 25% de su capacidad de retención, esto corresponde a 160 cm³ de espacio del lecho filtrante. De estos 160 cm³, el 49.45 % correspondería al trihidróxido de hierro, es decir 79.12 cm³; y 50.54 % corresponderían al dióxido de manganeso, es decir 80.86 cm³. Esto se calculó de acuerdo a las afinidades relativas del balance de materia calculado por los promedios de remoción de hierro y manganeso:

Promedio de retención de hierro: 96.88 %

Promedio de remoción de manganeso: 99.00 %

Afinidad hacia el hierro: $(96.88 + 99.00) \frac{\quad}{\quad} 100\%$

$$96.88 \frac{\quad}{\quad} X \quad X = 49.45 \%$$

Afinidad hacia el manganeso: $(96.88 + 99.00) \frac{\quad}{\quad} 100\%$

$$93.15 \frac{\quad}{\quad} X \quad X = 50.54 \%$$

La densidad del dióxido de manganeso es 5.026 g /cm³ y se tienen 80.86 cm³ disponible por lo que se podrían remover 406 g de Dióxido de manganeso que corresponde a 256 g de Mn.

La densidad del Trihidróxido de hierro hidratado $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ es de $3.4 - 3.9 \text{ g} / \text{cm}^3$ ($x: 3- 5$) y se tienen 79.12 cm^3 disponible por lo que se podría remover hasta 263 g de trihidróxido de hierro que corresponden a 87.9 g de Fe. Como el lecho filtrante tiene mayor afinidad al manganeso que al hierro, y además, se encuentra en mayor proporción, se convierte en el limitante de la filtración. Según lo anterior la vida útil del filtro antes de volver a ser regenerado será de 38 días tomando para esto un ejemplo extremo en cual el agua que se este tratando contenga una concentración de 7.5 ppm de Mn ya que este es el limitante. (Ver anexo # 12).

Sin embargo según la investigación bibliográfica de los análisis realizados por ANDA y propios de la investigación las mayores concentraciones de dióxido de manganeso oscilan entre $0.5 - 0.7 \text{ ppm}$ por lo cual el tiempo de vida útil del filtro antes de ser regenerado aumenta.

7. Análisis de las Muestras.

Resultados.

Después de obtener el diseño más adecuado y eficaz del filtro (# 5); se recolectan las muestras de las comunidades definidas al inicio del estudio; las cuales según datos obtenidos por diferentes fuente contienen altas concentraciones de Fe y Mn; estas fueron analizadas mediante las metodologías anteriormente descritas, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla N° 15. Resultados Colonia El Limón.

Muestras	Pozo: Colonia el Limón. Soyapango		Casa 1 Colonia el Limón. Soyapango		Casa 2. Colonia el Limón. Soyapango	
	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
HIERRO ppm	0.51	0.2	0.46	0.29	0.55	0.32
MANGANESO ppm	0.29	0.05	0.26	0.03	0.29	0.05
RESIDUO TOTAL mg/L	0.53	0.34	0.69	0.32	0.49	0.43
TURBIDEZ. Unidades nefalométricas (UNF)	4	1	3	2	4	1
pH	7.261	8.871	7.225	8.665	7.248	8.56
COLOR mg/L (Pt-Co)	1	1	1	1	1	1
SABOR N° de umbral de sabor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
OLOR N° de umbral de olor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
TEMPERATURA °C	30	29	29	29	29	29

Tabla N° 16. Resultados Colonia Prados de Venecia.

Muestras	Pozo Colonia Prados de Venecia Soyapango		Casa 1 Colonia Prados de Venecia Soyapango		Casa 2 Colonia Prados de Venecia Soyapango	
	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
Determinaciones						
HIERRO ppm	0.34	0.04	0.38	0.048	0.4	0.053
MANGANESO ppm	0.12	N.D.	0.14	N.D.	0.17	N.D.
RESIDUO TOTAL mg/L	0.65	0.45	0.69	0.45	0.61	0.48
TURBIDEZ. Unida-des nefalométricas (UNF)	1	0	4	1	2	0
pH	6.381	7.734	6.425	7.725	6.391	7.821
COLOR mg/L (Pt-Co)	1	1	1	1	1	1
SABOR N° de umbral de sabor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
OLOR N° de umbral de olor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
TEMPERATURA °C	30	29	29	29	29	29

Tabla N° 17. Resultados Colonia San Felipe.

Muestras	Pozo Colonia San Felipe. Ilopango		Casa 1 Colonia San Felipe. Ilopango.		Casa 2 Colonia San Felipe Ilopango.	
	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
Determinaciones						
HIERRO ppm	0.4	0.14	0.42	0.13	0.45	0.15
MANGANESO ppm	0.59	0.03	0.62	ND	0.65	N.D
RESIDUO TOTAL mg/L	0.58	0.53	0.6	0.45	0.55	0.42
TURBIDEZ. Unidades nefalométricas (UNF)	3	1	3	1	3	1
pH	7.073	7.459	7.112	7.655	7.125	7.791
COLOR mg/L (Pt-Co)	1	1	1	1	1	1
SABOR N° de umbral de sabor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
OLOR N° de umbral de olor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
TEMPERATURA °C	30	29	29	29	29	29

Tabla N° 18. Resultados Colonia Santa Carlota.

Muestras	Pozo Colonia Santa Carlota Barrio San Jacinto. San Salvador.		Casa 1 Colonia Santa Carlota Barrio San Jacinto. San Salvador		Casa 2 Colonia Santa Carlota Barrio San Jacinto San Salvador	
	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
Determinaciones						
HIERRO ppm	0.44	0.12	0.43	0.09	0.46	0.15
MANGANESO ppm	0.45	0.07	0.53	0.12	0.5	0.12
RESIDUO TOTAL mg/L	62	0.5	0.69	0.52	0.65	0.45
TURBIDEZ. Unidades nefalométricas (UNF)	9	3	9	3	6	3
pH	7.691	6.961	7.642	6.415	7.665	6.84
COLOR mg/L (Pt-Co)	1	1	1	1	1	1
SABOR N° de umbral de sabor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
OLOR N° de umbral de olor	NR	NR	NR	NR	NR	NR
TEMPERATURA °C	30	29	29	29	29	29

CAPITULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3. Comparación de la eficiencia de los diferentes filtros respecto a la remoción de Hierro y Manganeso según estabilidad física.

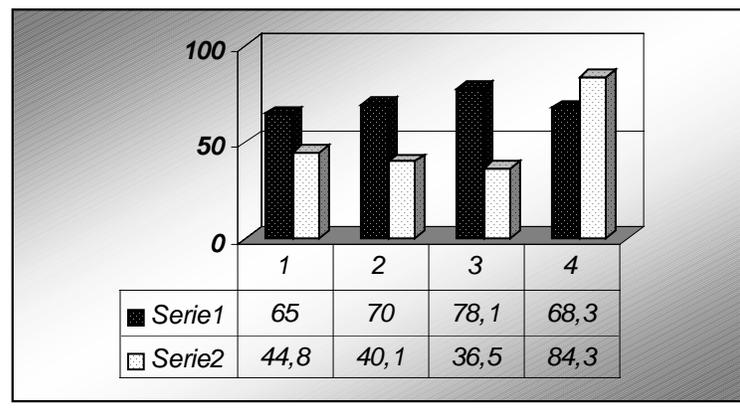


Grafico N° 5: Porcentajes de remoción de Hierro y Manganeso de los diferentes filtros elaborados.

En esta grafica se representa los porcentajes de hierro y manganeso que se han removido en base a las estabilidades del cuerpo de los filtros, se elaboró la grafica con cuatro de los cinco filtros ya que el último estaba elaborado eliminando los errores cometidos en los anteriores.

Las columnas de la serie 1 representan los porcentajes de remoción de hierro. Los de la serie 2, los porcentajes de remoción de manganeso. En los diseños 1, 2 y 3, se observa que el porcentaje de remoción de hierro va aumentando, esto se debe a que en la lava se va acumulando hidróxido de hierro III que sirve como catalizador para la adsorción de otras moléculas de $\text{Fe}(\text{OH})_3$; caso contrario ocurre con el porcentaje de remoción de manganeso, es decir que como el catalizador pirolusita no se sostiene en el lecho filtrante (por su finura), el

porcentaje de remoción permanece bajo y casi invariable. Por esta razón se procede a la construcción de un filtro que tuviera 2 capas de pirolusita para aumentar el porcentaje de remoción. Además que si recordamos, este filtro tenía una capa de sostén para la pirolusita de más fina (lava A). Para la construcción del cuarto filtro se sometió el tercer filtro a un lavado con 2 litros de NaOH 0.1 N y se dejó por 2 días para que tuviera una mayor acción disolvente de los hidróxidos retenidos. El resultado fue la salida de agua color rojo anaranjado debido a la gran cantidad de hierro y manganeso que había disuelto, además se lavó con agua hasta que saliera agua clara. Luego se sacaron los materiales para incorporarlos según el nuevo diseño. Como la lava estaba regenerada, la cantidad de hidróxido de hierro en el lecho era mínima, a esto se debe que el porcentaje de remoción de hierro haya disminuido. Las características de diseño del quinto filtro son accesorias, por esta razón no se reportan porcentajes de remoción para este, ya que prácticamente corresponde al diseño del cuarto filtro. Entre las modificaciones están: la capa de sostén, cambiando la grava por lava gruesa. La técnica de operación limitando el caudal de salida por medio de la válvula, con esto aumentaríamos el tiempo de contacto y recíprocamente la capacidad de retención del lecho filtrante. También se incorporó algodón en la capa de sostén para evidenciar pérdidas de pirolusita por ennegrecimiento del algodón y para disminuir el caudal de salida y de esta manera aumentar el contacto. La velocidad de flujo de salida, esta en relación proporcional indirecta con el tiempo de retención y de igual manera con el porcentaje de remoción, por esta razón se precisó que la

técnica adecuada de operación del filtro era con la válvula de salida poco abierta; lo suficiente como para obtener lo establecido para filtros lentos.

En cuanto a los resultados expuestos en las tablas 15, 16, 17, 18, de los lugares de muestreos se denota que el mayor porcentaje de remoción es del manganeso, ya que de algunas muestras fue removido totalmente, en base a que no fue detectado por los reactivos. Sin embargo en los análisis previos que se realizaron con estándares, la remoción de hierro fue mayor a la mostrada en las tablas; debido a que las condiciones de preparación de los estándares están controladas no así las ejemplares de agua que se tomaron de los lugares de muestreo.

Se manifiesta además un pequeño aumento en el pH luego del tratamiento de remoción de los minerales en el filtro esto puede deberse a que el flujo arrastre algunos hidróxidos formados durante la oxidación/reducción del hierro y manganeso. También en la determinación de residuo total se muestra una leve disminución del residuo en las muestras luego de ser tratadas lo que evidencia la remoción de las impurezas contenidas en las muestras.

4. Costo del Filtro.

Tabla N° 19: Costo del filtro

Tubo de PVC de 4 pulgadas x 1 metro	¢15
Lava volcánica (1 quintal)	¢100
Tapón de PVC	¢10
Envase de agua de 19 litros	¢50
Bomba de aire para pecera con mangueras y difusores	¢175
Tamizado *	¢75
Pirolusita MERCK (50 g)	¢20
Algodón	¢1
Válvula de media pulgada	¢12
Cinta de Teflón	¢2
Pega sellante de silicon	¢15
Niple galvanizado de ½ x 2”	¢5
TOTAL	¢ 480

*Operación realizada en SUCROCENTRO SA de CV.

La evaluación costo beneficio de la construcción del filtro se basa en el importante contribución que realizaría éste a la salud de la población al proveer de agua potable, ya como se menciona al inicio del documento la altas concentraciones de hierro y manganeso pueden

afectar la salud tanto humana como animal; siendo el caso que el agua se utilizara para éste ultimo fin. Además la remoción de estos dos minerales contribuye a la reducción de problemas tanto en el hogar como en fábricas donde sus sales manchan tanto losas como tejidos. Por lo cual el costo del filtro elaborado es sumamente bajo en relación con los beneficios que se pueden obtener de él.

CONCLUSIONES

- 1) El objetivo de construcción de este tipo de filtro es proporcionar las características de potabilidad que debe poseer el agua para consumo humano (eliminando de ésta el hierro y el manganeso), lo cual fué logrado; este filtro además posee una acción biológica ya que la ZOOGLEA también participa en la eliminación de microorganismos aunque esta investigación no estaba orientada a demostrar tal hecho.
- 2) EL filtro elaborado para uso domiciliario fue construido con todas las características de un filtro por gravedad, los parámetros de su diseño fueron tomados de la teoría de filtración por gravedad. Las modificaciones existentes en el modelo se debieron a las necesidades de remoción de los minerales de hierro y manganeso. Las modificaciones fueron apareciendo conforme avanzaba la investigación.
- 3) Los materiales para la elaboración del filtro fueron escogidos por sus propiedades electroquímicas ya que la oxidación de los minerales presentes no era completada por el oxígeno que se introducía en el aereador y era necesario una complementación de esta función de allí la necesidad de buscar materiales con este tipo de propiedades, como la rocas ígneas y el óxido de manganeso (pirolusita).

- 4) La estabilidad física es determinante en la elaboración del filtro, debido a que era necesario alcanzar una buena remoción, fue necesario la construcción de más de un filtro, ya que en los primeros la pérdida del catalizador (pirolusita) conducía a la baja remoción del hierro y manganeso. Por lo que se necesitó intercalar material más fino en el cuerpo del filtro para sostener el catalizador.

- 5) Los cambios en la calidad fisicoquímica del agua tratada, según los análisis mostraron porcentajes de reducción del 96.88 al 99 por ciento tanto para hierro como para el manganeso respectivamente. Y aunque la eliminación no fue del 100 por ciento, los valores logrados estaban dentro de las normas de contenido de hierro y manganeso para agua potables según Norma Salvadoreña.

- 6) El caudal de trabajo del filtro, como lo sugiere la bibliografía deben estar entre 0.78 y 3.75 m³/m²/hora para filtros lentos; para el filtro fabricado fué de 3.142.m³/m²/hora según datos obtenidos. Por lo cual este parámetro fue alcanzado satisfactoriamente logrando con esta velocidad de caudal los porcentajes de remoción antes mencionados.

- 7) Respecto al tiempo de vida útil; éste puede ser determinado en base a la concentración de manganeso presente en el agua ya que como se demostró en los cálculos realizados el filtro posee mayor afinidad al manganeso y por lo consiguiente este es él limitante para su uso. Sin embargo, el lavado con una solución adecuada devuelve al filtro su capacidad de remover el mineral en cuestión; gracias a que los silicoaluminatos de los cuales consta el filtro son bases permutables.
- 8) Según el análisis de costo beneficio, el valor de filtro fue de ¢ 480.00 sin embargo la elaboración de una cantidad mayor de filtros disminuye el costo de los materiales y el tiempo de elaboración, con lo cual disminuye considerablemente su valor; en cuanto al beneficio de filtro este puede proporcionar agua de buena calidad para el consumo humano con lo que se justifica su fabricación en lugares donde el agua se toma directamente de fuentes naturales sin ningún tratamiento.

RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda en las colonias donde se realizó la investigación la elaboración de un filtro de tamaño más apropiado para la remoción de los elementos, ya que si la investigación fue realizada para elaboración de un filtro domiciliario las características de los parámetros pueden ser extrapolados para la elaboración de un filtro para tratar cantidades mayores de agua e incluir los factores que hacen óptimo el trabajo de eliminación de los minerales en cuestión, (hierro y manganeso).

- 2) Una posterior investigación para comprobar la efectividad del filtro para la eliminación de microorganismos, ya que como se mencionó éste puede realizar la función de eliminación de microorganismos patógenos por medio de la ZOOGLA, esto no fue comprobada en el presente documento debido a que se enfocó en los parámetros fisicoquímicos.

- 3) Promover entre las instituciones y/o empresas responsables del servicio del agua potable, un control fisicoquímico y microbiológico del agua, ya que al ser ellos responsables de su distribución también son responsables de los problemas que pueden traer microorganismos y minerales que perjudican la salud de las personas que la ingieren.

- 4) Promover la investigación en el uso de menos productos químicos y en cambio más procesos mecánicos para el tratamiento de agua, ya que éstos (productos químicos) al mismo tiempo que ayudan también pueden perjudicar la salud y aumentan los procesos que se deben aplicar al agua para potabilizarla.

- 5) Promover la investigación en la utilización de recursos naturales como las rocas ígneas etc. Para otros tipos de métodos de filtración, con los cuales se puedan remover impurezas tanto orgánicas como minerales haciendo uso adecuado de los recursos con los que cuenta el país.

GLOSARIO

Aireación: introducción de aire a un sistema determinado.

Antracita: Carbón natural con bajo contenido de materiales volátiles.

Catalizador: Sustancia que acelera o retrasa la velocidad de una reacción química, pudiendo recuperarse sin cambios esenciales en su composición al final de la reacción.

Cuenca colectora: Territorio en cuyo subsuelo abunda un determinado mineral. Territorio cuyas aguas afluyen todas a un mismo río, lago o mar.

Cristalografía: Estudio de los cristales y de la materia cristalina.

Chiflones: Canales por donde sale el agua con fuerza.

Decantador: Sistema por medio del cual se separan sustancias líquidas de sedimentos.

Dolomitas: Carbón cálcico magnésico, perteneciente al sistema romboédrico, constituyente corriente de las rocas carbonatadas.

Eluviación: lixiviación de la capa superficial por el agua infiltrada que arrastra verticalmente minerales en disolución.

Freático: Relativo a las aguas acumuladas en el subsuelo.

Fluviales: Perteneciente o relativo a los ríos.

Floculación: Acción de formación de floculo en el seno de un fluido por coagulación, aglomeración de partículas sólidas suspendidas en el mismo.

Hemocromatosis: Trastorno hereditario en el que se absorbe demasiado hierro potencialmente mortal pero fácilmente tratable.

Lixiviación: Traslado de sustancias a través del suelo en forma soluble.

Mena: Yacimiento de minerales.

Osmosis invertida: Técnica utilizada en los procesos de desalación del agua del mar y purificación de aguas residuales, consistente en la aplicación de una presión superior a la osmótica a la disolución salina (o residual), que determina un flujo de agua inverso al de la osmosis, con lo que aquella se separa de las sustancias disueltas.

Oxido-reducción: Proceso químico en el que simultáneamente se producen reacciones de oxidación y de reducción.

pH: Variable que se emplea para caracterizar el grado de acidez de una disolución; es el logaritmo decimal del inverso de la actividad del ion hidrogeno.

Pirolusita: Oxido de manganeso (MnO_2) de color negro y brillo metálico, pseudo tetragonal. Es la principal mena de manganeso.

Pluvial: Periodos de lluvia en una región determinada.

Retrolavado: Lavado que se realiza en sentido apuesto al curso normal o flujo inverso al normal.

Rocas Ígneas: Material sólido o semisólido que se origina de las erupciones volcánicas.

Tierra Diatomeas: Biosilicica formada principalmente de por caparazones de diatomeas.

Zeolita: Grupo de minerales o de productos sintéticos constituidos esencialmente por aluminosilicatos cristalinos. Se utilizan principalmente como catalizadores y adsorbentes.

Zooglea: Forma de crecimiento en la cual las células individuales están rodeadas por un moho muy extenso.

BIBLIOGRAFÍA

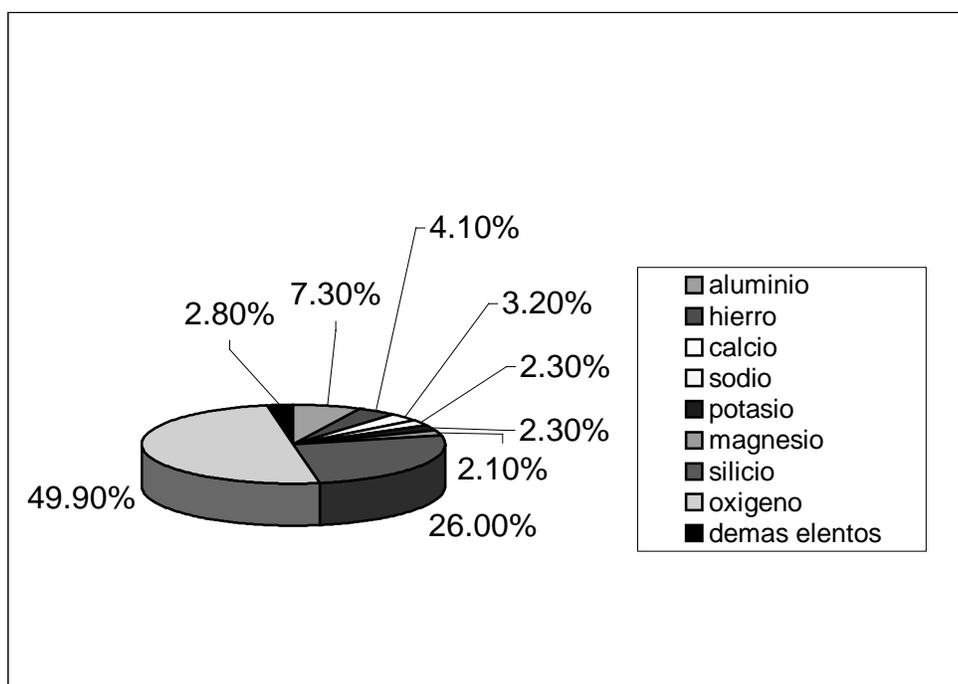
1. KEMER N. Frank. "Manual del agua su naturaleza, tratamiento y aplicaciones", 2da edición, McGraw-Hill I y II, 1982.
2. DICCIONARIO Merck. "Información medica para el hogar", Grupo editorial Océano.
3. HELMAN, José. "Farmacotecnia teórica y practica", CIA. Editorial Continental, S.A. México 1982, tomo III Pág., 853-919.
4. POWELL, SHEPPARD T. "Manual de aguas para usos industriales", Ediciones ciencia y técnica S.A. Editorial Limusa 1988, volumen I Pág., 13-108.
5. CARPENTER, Philip L. "Microbiología" 4ta Edición, Editorial Interamericana, 1974, México.
6. Agua, su calidad y Tratamiento. American Waters Works Association (AWWA). Traducción autorizada de la segunda edición en ingles.
7. MARTÍN, Alfred N. "Principios de Físico Química para Farmacia y Biología" 2da Edición, editorial alambra 1967. México.

8. PERRY, Robert H. /CECIL H, Chilton. “Manual del Ingeniero Químico”, 5gta Edición, Libros McGraw Hill 1987, México DF. Vol. I, sección 3-98.
9. BONILLA, Gildaberto. “Estadística I” 3ª edición UCA Editores San Salvador, 1995.
10. “Agua y Aguas de desecho Asociación Americana para la salud Publica” 11ª Edición, Washington, Estados Unidos de Norte América.
11. HIMMELBLAU, David M. “Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química”, 1ª edición, Compañía Editorial Continental 1974. México.
12. MORALES, SANDOVAL, PLUTARCO ANTONIO, “Evaluación del Problema de la remoción del hierro y manganeso en aguas naturales” Trabajo de Graduación, El Salvador, Universidad de el Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 1975.
13. HERNÁNDEZ GUZMÁN, Ana Cecilia, “Diseño y Construcción de un Filtro de Agua para uso Domiciliar en áreas Rurales”, Trabajo de Graduación, El Salvador, Universidad de el Salvador, Facultad de Ingeniería Civil, 1988.

14. <http://edafologia.urg.es/hidro/rasgos.html/conceptos>.
15. <http://www.monografias.com/trabajos/geohidro/shtml>.

ANEXOS

ANEXO 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS EN LA CORTEZA TERRESTRE.



ANEXO N ° 3. GRAFICA DE LOS LIMITES DE FILTRACIÓN.

N.S.O.13.07.01:97

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR RECOMENDADO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE
COLOR VERDADERO	mg/L (Pt-Co)	--	15
OLOR	Nº DE UMBRAL DE OLOR	N.R	3
SABOR	Nº DE UMBRAL DE SABOR	N.R	1
pH	--	6.0 – 8.5	--
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS	mg/L	300	600
TEMPERATURA	°C	18 a 30	N.R
TURBIEDAD	UNIDADES NEFALOMÉTRICAS	1	5
HIERRO TOTAL	mg/L	0.05	0.3
MANGANESO	mg/L	0.05	0.1

N.R: no rechazable.

ANEXO 5: Últimos análisis de ANDA (Mayo 2001), de los pozos con una mayor problemática de Hierro y Manganeseo en los municipios del departamento de San Salvador

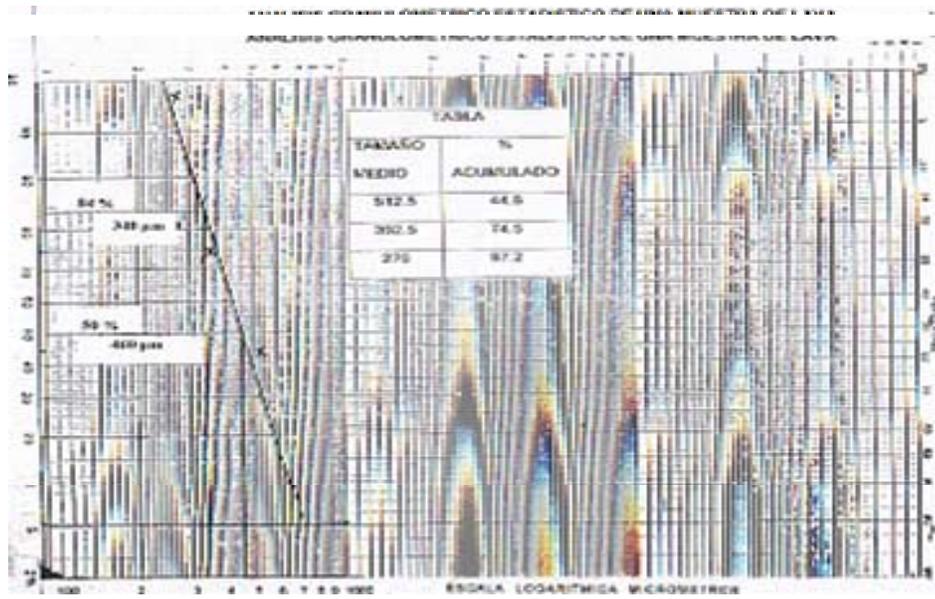
DISTRITO	MUNICIPIO	LUGAR	HIERRO	MANGANESO
San Salvador	San Salvador	♦San Jacinto. C. Lara	ND.	ND.
	Cd. Delgado	Cayala Km 11	0.03	0.08
	Soyapango	♦Prados de Venecia	0.01	0.005
		♦Col. El Limón	0.6	0.4
	Ilopango	♦Col. San Felipe	0.62	0.74
Tonacatepeque	Tonacatepeque	Col. Santa Teresa	0.85	0.40
	Apopa	Col. Santa Marta	0.14	ND.
	San Martín	Chalapán	0.18	ND.
Santo Tomás	Santo Tomás	Joya Grande Calle a Asino	0.26	0.44
	San Marcos	Col. Los Andes	1.3	0.35
	Rosario de Mora	♦♦	2.8	0.3

♦Lugares de muestreo

♦♦En este municipio los pozos no pertenecen a ANDA

En los municipios de Mejicanos, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Guazapa, Aguilares, Nejapa, El Paisnal, Panchimalco, Santiago Texacuangos; la concentración de hierro y manganeso se eleva debido a fallas en la operación de la planta de bombeo, por lo que no se les ubica como pozos con historial de problemas de hierro y manganeso.

ANEXO N° 6



ANEXO N° 7. EJEMPLO DE CÁLCULOS

1. Cálculo de la concentración de hierro para las muestras de los pozos de Colonia San Felipe y Prados de Venecia.

Prados de Venecia	San Felipe
Volumen de muestra: 50 ml	Volumen de muestra: 50 ml
Aforo final: 50 ml	Volumen de aforo: 50 ml
Absorbancia obtenida agua cruda: 0.063	Absorbancia obtenida agua cruda: 0.074
Absorbancia obtenida agua filtrada: 0.007	Absorbancia obtenida agua filtrada: 0.024
Despejando de la ecuación de regresión de	Despejando de la ecuación de regresión
la curva de calibración: $Y = 0.1873 X$	$Y = 0.1873 X$, donde Y es absorbancia y
donde Y es absorbancia y X	X
concentración	concentración en mg/l
en mg/l	Concentración de hierro en agua cruda:
Concentración de hierro en agua cruda:	$0.074 / 0.1873 = 0.40$
$0.063 / 0.1873 = 0.34$ ppm	Concentración de hierro en agua
Concentración de hierro en agua filtrada:	filtrada:
$0.007 / 0.1873 = 0.04$ ppm	$0.024 / 0.1873 = 0.128$ ppm.

ANEXO N° 8. CÁLCULO DEL RESIDUO TOTAL.

Peso de las cápsulas previamente taradas (B)	Peso de las cápsulas con residuo de 50 ml de agua llevado a peso constante. (A)	Residuo total en mg/l. [(A) – (B)] x 20
Cap.1. 72.1460 (Pozo S.J. AF)	72.1770	0.62
Cap.2. 76.1710 (Pozo S.J DF)	76.1960	0.50
Cap.6. 66.3940 (Pozo PV AF)	66.4285	0.69
Cap.3. 84.1165 (Pozo PV DF)	84.1390	0.45
Cap.5. 77.2400 (Pozo SF AF)	77.2690	0.58
Cáp.4. 74.5115 (Pozo SF DF)	74.5380	0.53
Cap7. 66.3940 (Pozo EL AF)	66.4205	0.53
Cap8. 77.2400 (Pozo EL DF)	77.2570	0.34

SJ: SAN JACINTO

P.V: PRADOS DE VENECIA

SF: SAN FELIPE

EL: EL LIMÓN

AF: ANTES DE FILTRAR

DF: DESPUÉS DE FILTRAR

ANEXO N° 9. EJEMPLOS DE DILUCIÓN PARA PREPARACIÓN DE ESTÁNDAR.

PARA PASAR LUEGO A FILTRO.

100 PPM (SOLUCIÓN MADRE)



1 ml \longrightarrow 10 ml (10 ppm) = 0.1 mg de Fe.
Tomar y aforar.

100ml \longrightarrow 1000 ml (10 ppm)
Tomar y aforar.



FILTRO

ANEXO No. 10. CALCULO PARA DETERMINAR PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN EL FILTRO.

Análisis de 1 lts de Agua conteniendo 10 ppm de Fe, se tomo 100 ml de solución madre de hierro, conteniendo 100 ppm de hierro; se aforo a 1000 ml para obtener una concentración de 10 ppm según anexo anterior y se procedió a oxidación en la cámara aereadora y luego se paso por el filtro obteniéndose los siguientes resultados.

Estándar: 0.526 absorbancia.

Muestra : 0.017 absorbancia.

Calculo según ley de Beer.

Cmx: $(Cst/Ast) \times Amx$.

Así: Cmx: $(10\text{ppm}/0.526) \times 0.017$.

Cmx: 0.323 ppm.

Donde: Cmx = Concentración de la muestra

Cst = Concentración de estándar.

Ast = Absorbancia de estándar.

Amx = Absorbancia de la muestra.

Calculo de porcentaje: $10 \text{ ppm} \text{ ----- } 100\%$
 $0.323 \text{ ppm} \text{ ----- } X$.

X: 3.23 % contenido en la muestra luego del tratamiento con el filtro.

Porcentaje de remoción: $100 \% - 3.23\% = 96.77 \%$

ANEXO No. 11. EJEMPLO DEL CÁLCULO DE VIDA ÚTIL PARA EL FILTRO CON CONCENTRACIÓN DE MANGANESO CONOCIDA.

Según datos obtenidos prácticamente:

Caudal del filtro: 36.92 L/Hr.

Área disponible para remoción según cálculos de espacio intersticial: 80.86 cm³.

Concentración de manganeso 7.5 ppm = 7.50mg/L.

Así:

Si el filtro tiene un caudal de 36.92 litros ----- 1 hora

Con la concentración de manganeso serian: 276. 75 mg de manganeso por hora atravesando el filtro pero como el porcentaje de remoción es del 99 % tenemos 273.98 mg removidos por hora.

Como la capacidad del filtro fue determinada para un 25%. De su capacidad total antes de lavarlo este era capaz de remover 256 g de manganeso.

Si en 1 Hora remueve ----- 0.27398 gramos

Para alcanzar a remover 256 gramos de manganeso se necesitaran 934 horas, 38 días antes de alcanzar el 25% de su capacidad.

Para alcanzar el 100 % necesitaríamos 152 días con una concentración de 7.5 ppm sin embargo como lo muestran la tabla del anexo No.5 las concentraciones de manganeso encontradas por ANDA oscilan entre 0.5 y 0.7 ppm por lo cual al tratar esta agua la vida útil del filtro aumenta