



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**REDUCCIÓN DE HIERRO MANGANESO Y DETERGENTE EN EL AGUA,
POR MEDIO DE ARENA VERDE DE MANGANESO Y CARBÓN ACTIVADO**

JOSÉ GUILLERMO CASTANEDA CASTRO

Asesorado por Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, septiembre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDUCCIÓN DE HIERRO MANGANESO Y DETERGENTE EN EL AGUA,
POR MEDIO DE ARENA VERDE DE MANGANESO Y CARBÓN ACTIVADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Presentado a Junta Directiva de la

Facultad de Ingeniería

POR

JOSÉ GUILLERMO CASTANEDA CASTRO

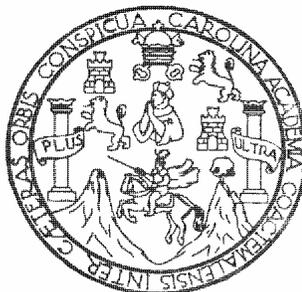
Asesorado por Ing. Zenón Much Santos

Al conferírsele el título de

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADORA	Inga. Fulvia de León
EXAMINADOR	Ing. Roberto Díaz
EXAMINADOR	Ing. Francisco Rosales
SECRETARIO	Ing. Edgar José Aurelio Bravatti Castro

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REDUCCIÓN DE HIERRO MANGANESO Y DETERGENTE EN EL AGUA, POR MEDIO DE ARENA VERDE DE MANGANESO Y CARBÓN ACTIVADO

Tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 29 de octubre de 1992.

José Guillermo Castaneda Castro

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VI
RESUMEN	VIII
OBJETIVOS	IX
HIPÓTESIS	X
INTRODUCCIÓN	XI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Hierro	3
2.1.1 Características químicas	3
2.1.2 Efectos de salud	4
2.1.3 Otros problemas del hierro	4
2.2 Manganeso	5
2.2.1 Características químicas	5
2.2.2 Efectos de salud	6
2.2.3 Otros problemas del manganeso	6
2.3 Detergentes	6
2.3.1 Características químicas	6
2.3.2 Otros aspectos	7
2.4 Métodos de remoción hierro, manganeso y detergente	8
2.4.1 Métodos de remoción hierro y manganeso	8

2.4.2	Tratamiento de hierro y manganeso a través de arena verde de manganeso	9
2.4.3	Remoción de detergentes	10
2.4.4	Reducción de detergente con carbón activado	11
3.	RESULTADOS	13
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	17
	CONCLUSIONES	25
	RECOMENDACIONES	27
	REFERENCIAS	29
	BIBLIOGRAFÍA	33
	APÉNDICE	35
	ANEXO	41

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Concentración del hierro en el agua tipo “B” antes y después del tratamiento con el filtro y el LMP	18
2.	Concentración del manganeso en el agua tipo “B” antes y después del tratamiento con el filtro y el LMP	19
3.	Concentración del detergente en el agua tipo “B” antes y después del tratamiento con el filtro y el LMP	21
4.	Comportamiento del hierro en el agua del pozo y el agua después de la columna de arena verde	22
5.	Comportamiento del manganeso en el agua del pozo y después del sistema de arena verde	23
6.	Comportamiento del agua del pozo y el agua tratada, en cuanto al contenido de detergente con carbón activado	24
7.	Sistema de arena verde y carbón activado	37
8.	Sistema de tratamiento de agua columna de glauconita y carbón activado	38
9.	Ubicación del pozo de la Colonia Molino de Las flores II	39

TABLAS

I.	Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua Tipo "B". Molino de Las Flores II. Prueba 1	13
II.	Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua Tipo "B". Molino de Las Flores II. Prueba 2	13
III.	Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua Tipo "B". Molino de Las Flores II. Prueba 3	14
IV.	Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua Tipo "B". Molino de Las Flores II. Prueba 4	14
V.	Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua Tipo "B". Molino de Las Flores II. Prueba 5	15
VI.	Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua Tipo "B". Molino de Las Flores II. Prueba 6	15
VII.	Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua Tipo "B". Molino de Las Flores II. Prueba 7	16

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°F	Grados Fahrenheit
mg/L	Miligramos por litro de solución
ppm	Partes por millón
LMA	Límite máximo aceptable
LMP	Límite máximo permisible
pH	Potencial de hidrógeno
GPM	Galones por minuto

GLOSARIO

Absorción	El proceso que una sustancia penetra dentro de la estructura de otra sustancia.
Adsorción	El proceso físico que ocurre cuando líquidos, gases o sólidos, o materia suspendida se adhiere a la superficie de un medio adsorbente.
Adsorbente	Un medio de tratamiento de agua, usualmente sólido, capaz de la adsorción de líquidos, gases y/o materia en suspensión.
Arena verde de manganeso	Arena verde que ha sido procesada para incorporar los óxidos más altos del manganeso en sus poros y superficie. Tiene capacidad de oxidar el hierro, manganeso y/o sulfuro de hidrógeno.
Carbón activado	Un medio de tratamiento de agua, disponible en formas de bloque, granular o en polvo, que es producido por calentamiento de sustancias carbonosas a 700°F.

Oxidación	Proceso en que una molécula, átomo o ión pierde electrones por un oxidante.
Permanganato de potasio	Es un regenerante efectivo en los filtros de arena verde de manganeso.
pH	Logaritmo de base 10 del recíproco de la concentración iónica del hidrógeno en una solución.
Regeneración	Proceso por medio del cual se devuelve la capacidad de intercambio de un medio tratante (resina, arena verde) a través de un regenerante (sal, ácido, permanganato de potasio).
Retrolavado	Paso de flujo ascendente de agua, para aflojar el medio oxidante.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación titulado **Reducción de hierro, manganeso y detergente en el agua, por medio de arena verde de manganeso y carbón activado**, demuestra que a través de una columna de arena verde de manganeso y carbón activado, puede reducirse el hierro, manganeso y detergente a los límites máximos aceptables de la norma COGUANOR NGO 29 001, Agua potable para el consumo humano.

Durante un período de 8 semanas, se tomaron muestras de agua tipo “B” del pozo No. 1 de la Colonia Molino de Las Flores y fueron enviadas al Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos Dra. Alba Tabarini Molina, ubicado en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Los métodos utilizados se encuentran descritos en el *Standard Methods for Examination of Waster and Wastewater* aceptados en Guatemala y la norma COGUANOR NGO 29 001.

Como resultado de los análisis del agua tipo “B” del pozo No. 1, el hierro, manganeso y el detergente, se encontraron por arriba de los límites máximos permisibles de la norma COGUANOR. En base a los resultados de la investigación se redujeron los niveles de hierro y manganeso a los límites aceptados por la norma COGUANOR NGO 29 001 y el detergente puede ser removido con carbón activado, manejando una velocidad de flujo de 1 gpm.

OBJETIVOS

General

Evaluar por medio del sistema de tratamiento de arena verde de manganeso, filtración y carbón activado, la reducción del hierro, manganeso y detergente presente en el pozo uno de la Colonia Molino de Las Flores, a los niveles permitidos por la norma COGUANOR NGO 29 001.

Específicos

1. Establecer los procedimientos de mantenimiento para la adecuada operación de los filtros de arena verde de manganeso y carbón activado.
2. Aportar elementos técnicos básicos para el tratamiento del agua con problemas similares en el campo del tratamiento de agua para el consumo humano.
3. Preparar un informe a la Coopidiagua Molino de Las Flores II R. L. de los resultados obtenidos, para que sean valorados como una posibilidad de implementar el tratamiento y mejorar la calidad de agua a toda la comunidad.

HIPÓTESIS

El agua denominada tipo “B” del pozo No. 1 que suministra la Cooperativa Molino de Las Flores II, contiene niveles fuera de la norma de los parámetros de hierro, manganeso y detergente: por lo tanto no cumple con las especificaciones de agua potable según la norma COGUANOR NGO 29 001 y no es apta para el consumo humano.

Si al agua suministrada por la cooperativa Molino de Las Flores II se le aplica un tratamiento para reducir los contaminantes de hierro, manganeso y detergente, se puede obtener una agua apta para el consumo humano.

INTRODUCCIÓN

En los últimos cinco años, se ha incrementado la perforación de pozos, en la ciudad capital de Guatemala, con el objeto de satisfacer la demanda de agua potable de la creciente población.

El agua de pozo presenta, en ocasiones, características físicas y químicas que no permiten su uso para el consumo humano, por la presencia de ciertos minerales, tales como el hierro, el manganeso y la presencia de compuestos químicos, productos de la contaminación ambiental, como es el detergente.

Por esta razón, es necesario realizar un tratamiento al agua, para reducir los compuestos indeseables y hacer que cumpla con las normas establecidas para agua potable.

El presente trabajo es una evaluación de una planta piloto, constituida por una columna de arena verde manganeso, un filtro de sedimento y una columna de carbón granular activado. Se le introduce agua suministrada por la cooperativa de agua potable de la Colonia Molino de Las Flores II, denominada agua tipo "B", por la presencia de detergentes, hierro y manganeso. Las manifestaciones físicas de estos compuestos, se verifica en la presencia de espuma y la deposición de sedimento negro en las tuberías de distribución.

La construcción de la columna de arena verde, está fundamentada en las especificaciones de operación de la arena verde que indica que el flujo superficial de servicio a través de la columna es de 5 GPM/pie². Esto permite determinar el diámetro del cilindro que contiene la arena verde y es una condición necesaria para que la cinética de la reacción se realice adecuadamente.

La columna de carbón activado, está diseñada para mantener un flujo de 2 GPM, con el objeto de que el tiempo de contacto del agua con la columna de adsorción permita retener mayor cantidad de detergente.

Con estos dos sistemas de tratamiento se lograron los resultados que permiten reducir los niveles de contaminantes a los niveles permitidos por la norma COGUANOR NGO 20 001.

1. ANTECEDENTES

La Cooperativa de Molino de Las Flores, ha buscado alternativas para mejorar la calidad de agua del pozo No. 1, ya que es un pozo que tiene un caudal estimado en 90 GPM, que le permite abastecer la demanda de agua de unas 250 casas.

La cooperativa a través de una de las juntas directivas, autorizó la implementación de un tratamiento a base de ozono, para el suministro de agua para toda la colonia, pero los resultados no fueron satisfactorios y se abandonó el proyecto. Es por esa razón que se solicitó a la junta directiva, construir una planta piloto para la reducción de los tres contaminantes y evaluar la posibilidad e implementarlo a nivel de toda la planta.

Con respecto a estudios realizados en la remoción de hierro manganeso y hierro con arena verde, se encuentra el trabajo de la Ingeniera Ivette María Morazán Rodríguez, quien hizo una evaluación de la reducción de hierro y manganeso en la planta potabilizadora de Santa Luisa de la ciudad de Guatemala. En dicho estudio se hace una comparación de remoción hierro y manganeso, por medio de un filtro de arena sílice y arena verde, introduciendo como factor determinante en la efectividad de la remoción de hierro y manganeso, en la columna de arena verde que en la columna de arena sílice.

En el caso de la planta piloto, nos enfocamos a la oxidación de hierro y manganeso, utilizando como regenerante permanganato de sodio, para formar una capa de óxido de manganeso, el cual realiza en la superficie de la arena verde el proceso de oxidación, formando un hidróxido férrico insoluble. Se establece un sistema de regeneración intermitente. Se realizan procesos de retrolavados, para limpiar el sedimento acumulado en la superficie de la media. Estos retrolavados se realizan con agua limpia. Adicional al sistema, se presenta el contenido de detergente, que no es muy común como contaminante de agua subterránea. Y en la revisión de la literatura, no se encuentra un trabajo que establezca un sistema para la reducción de estos tres compuestos simultáneamente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Hierro

2.1.1 Características químicas

Es un elemento común, con frecuencia presente en agua subterránea en cantidades que van de 0.01 a 10.0 ppm (mg/L) El hierro puede encontrarse de tres maneras.

1. En forma soluble como el bicarbonato ferroso,
2. Unido a compuestos orgánicos solubles,
3. Como partículas suspendidas de hierro férrico.

El hierro ferroso usualmente se encuentra en agua de pozos. Está presente debido a la solubilidad de bicarbonato ferroso, como un resultado de la acción del dióxido de carbono depositado en el suelo. Generalmente, cuando el hierro se encuentra soluble en el agua, es un agua clara, después de cierto tiempo por la acción del aire se colorea, tomando un color café. Lo que sucede químicamente es que al exponerse al aire, el oxígeno molecular entra en el agua y el dióxido de carbono se escapa y el oxígeno oxida el ión ferroso (Fe^{++}) a ión férrico (Fe^{+++}). En este punto el ión férrico se combina con los iones libres de los iones hidrófilos, para formar un compuesto gelatinoso denominado hidróxido férrico.(1)

2.1.2 Efectos en la salud

La ingestión de hierro en grandes cantidades ocasiona alteraciones en los mecanismos normales de regulación y éstos no operan de manera efectiva y se origina daño en los tejidos como consecuencia de la acumulación de hierro. No obstante, se han presentado casos de hemocromatosis debido al consumo prolongado de alimentos cocidos en utensilios de hierro. (2)

2.1.3 Otros problemas del hierro

El contenido de hierro del agua es de considerable importancia, ya que aún en pequeñas cantidades generan problemas en el agua para propósitos domésticos e industriales. Los estándares de la norma COGUANOR NGO 29 001 **agua potable** en los intervalos LMA = 0.100 mg/L y en LMP = 1.000 mg/L. Las manifestaciones más frecuentes de hierro, afectan a las características organolépticas del agua como por ejemplo genera un sabor metálico, una vez que ha sido oxidado el hierro afecta a la apariencia, mostrando un color café. Los efectos del hierro en lavandería y tintorerías se manifiestan, provocando manchas en la ropa.

El compuesto férrico produce sedimento en las tuberías, el cual favorece al crecimiento de las bacterias de hierro. Existen alrededor de 18 o más variedades de bacterias de hierro. La clasificación más ampliamente aceptada es:

- a) Gallionella
- b) Crenothrix, y
- c) Leptotrix

Estas bacterias se desarrollan de manera abundante en las tuberías de agua al extremo que obstruyen el flujo de agua. (3)

2.2 Manganese

2.2.1 Características químicas

El manganeso se encuentra frecuentemente en el agua como ión manganeso (Mn^{++}). Las sales del manganeso son generalmente más solubles en soluciones ácidas que en soluciones alcalinas. El ión manganeso usualmente introducido en el agua a través de la solubilidad del bicarbonato manganeso.

En algunas aguas superficiales y pozos poco profundos, se puede encontrar compuestos orgánicos y coloides de manganeso. También pueden existir bacterias de manganeso, similares a las ferrobacterias. (4)

Generalmente el manganeso está presente junto al hierro, por esa razón la presencia de ambos hace más complicada la eliminación del agua, debido a que son solubles a diferentes pH.

El bicarbonato de manganeso en solución no genera color. Al exponerse al aire se convierte de agua clara en agua de color negro, la cual contiene el compuesto insoluble de dióxido de manganeso. (5)

La reacción ocurre cuando el ión manganeso se convierte a dióxido de manganeso de la manera siguiente:



2.2.2 Efectos en la salud

Se considera que el manganeso es uno de los elementos menos tóxicos. En experimentos de ingestión crónica realizados con conejos, cerdos y ganado vacuno, con niveles de dosificación de 1 – 2 mg/L de peso corporal, no se manifestaron otros efectos que un cambio en el apetito y una reducción en el metabolismo del hierro para formar hemoglobina. (6)

2.2.3 Otros problemas del manganeso

En pequeñas concentraciones de manganeso, luego de pasar al estado insoluble, como es dióxido de manganeso produce manchas en ropa, servicios sanitarios y depósitos negros en las tuberías, cuando estos sedimentos son mayores pueden obstruirlas y formar colonias de bacterias de manganeso. Debido a que disuelto el óxido de manganeso es menor que el hierro es generalmente más difícil de remover del agua. (7)

2.3 Detergentes

2.3.1 Características químicas

Son sustancias de materiales orgánicos superficialmente activos en soluciones acuosas. Las moléculas de los compuestos superficialmente activos son grandes, un extremo de la molécula muy soluble en agua y el otro extremo soluble en aceite, generalmente se utilizan como sales de sodio y potasio. (8)

Los detergentes en el agua alteran su tensión superficial y permiten la formación de burbujas estables en el agua, gracias a su contenido de agentes superficiales activos o surfactantes, sustancias que combina en una sola molécula un grupo fuertemente hidrófobo con un fuertemente hidrofílico. El grupo hidrófobo es generalmente un radical hidrocarburo de 10 a 20 átomos de carbono, no polar. El grupo hidrofílico, polar, es de 2 tipos el que se ioniza en el agua y el que no lo hace. Esto origina los detergentes catiónicos y aniónicos así como los no iónicos o híbridos. La solubilidad en el agua la producen los grupos $-\text{COO}^-\text{Na}^+$; *sulfato* $-\text{SO}_4^-\text{Na}^+$; hidróxido OH^- ; y sulfonato $-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$. (9)

En general son sulfatos y sulfonatos, entre los que se encuentran el sulfato laurel de sodio, sulfonato alquil benceno (ABS) y el sulfonato alquil benceno lineal (LAS). La biodegradabilidad de los detergentes depende de su estructura química, pueden ser fácilmente descompuestos o difícilmente de utilizar como alimento de bacteria. Los fabricados con ABS son resistentes al ataque biológico por su composición molecular ramificada y por la adhesión de los anillos bencénios a los átomos terciarios de carbón de los grupos de cadena ramificada. Los fabricados con base en las LAS son biodegradables en condiciones aeróbicas, pero se resisten a la actividad bacteriana anaeróbica. (10)

2.3.2 Otros aspectos

Los detergentes causan problemas de espuma en agua superficiales, lagos, plantas de lodos activados y en general en sitios de aguas turbulentas de aguas residuales. La molécula de detergente tiende a formar capas sobre la superficie del agua, con la cabeza hidrofílica en el agua y la cadena larga de hidrocarburo hidrófobo no polar en el exterior del agua. (11)

El procedimiento para determinar el contenido de detergente en el agua consiste en agregar una solución de azul de metileno estándar a la muestra para que forme una sal de color azul con el LAS o ABS. La cual se extrae con cloroformo y la intensidad del color azul se mide con un espectrofotómetro a 652 Nm. Los resultados se reportan como sustancias activas al azul de metileno SAAM expresadas como LAS o ABS según el estándar utilizado en la cuantificación. (12)

2.4 Métodos de remoción de hierro, manganeso y detergentes

2.4.1 Métodos de remoción de hierro y manganeso

Existen varios métodos para remoción de hierro y manganeso, aplicados de acuerdo al estado en el cual los elementos se encuentren.

Por ejemplo, para cuando se encuentra en estado ferroso (Fe^{+2}) y manganesoso (Mn^{+2}), las tecnologías recomendadas para la reducción de ambos a los niveles que pide la norma COGUANOR NGO 29 001 son las siguientes:

- A través de filtros oxidantes (arena verde manganeso)
- Oxidación, coagulación y/o filtración de los precipitados
- Intercambio iónico
- Aireación presurizada y filtración
- Destilación
- Osmosis inversa
- Electrodiálisis

Para cuando los compuestos de hierro y manganeso, se encuentran en estado férrico (Fe^{+3}) y mangánico (Mn^{+4}) la tecnología del tratamiento es:

- Filtración con arena sílica y cartuchos
- Con arena verde manganeso
- Calcita, para elevar el pH a 7.5. (13)

2.4.2 Tratamiento de hierro y manganeso a través de arena verde de manganeso

Los filtros con medio de arena verde reducen el hierro y manganeso con una combinación de oxidación, intercambio iónico y trampa de partícula. Existen dos procesos comunes para su regeneración: uno requiere de continua alimentación de permanganato de potasio y cloro, y el otro usa permanganato de potasio como un regenerante tipo “*batch*”. (14)

Los procesos *batch* se utilizan en aplicaciones con pequeñas cantidades de hierro y manganeso cuando el sistema se opera sin emplear un operador. (15)

La regeneración consiste en un retrolavado de 10 minutos a un flujo de 10 GPM/pies² con una concentración de una onza de permanganato por pie³ de arena verde, luego un enjuague lento para mejorar el tiempo de contacto y para eliminar el permanganato residual, y un enjuague rápido de 5 minutos. El promedio de la regeneración entera dura menos de una hora. (16)

Para fines de esta investigación se optó utilizar un medio filtrante con acción química, como es la arena verde de manganeso. Esta arena tiene propiedades de intercambio iónico y la capa de bióxido de manganeso, producto de la regeneración con permanganato de potasio, se forma en la superficie del medio y tiene la capacidad de oxidar al hierro y al manganeso soluble. (17)

El recubrimiento de bióxido de carbono también reduce el exceso de permanganato de potasio, en caso de existir una sobrealimentación, la arena actúa como un catalizador Redox, capaz de oxidar y reducir al hierro y manganeso, esto permite producir afluentes consistentes de calidad y operación.

El pH del agua y la temperatura, son factores importantes para que la acción de la arena verde, en la reducción del hierro y manganeso sea eficiente. El pH del agua de entrada para un sistema de arena verde debe ser mayor de 6.2 y si el pH es debajo de 6.5 y 6.8 deben hacerse correcciones del pH debido a que la solubilidad del hierro es mayor a pH debajo de 6.2 en el caso del manganeso, la solubilidad es en pH debajo de 8.5 a 9.0, por eso que cuando las cantidades de manganeso son altas, se tiene que elevar el pH a los valores de 8.5 y 9.0. (18)

2.4.3 Remoción de detergentes

Estos compuestos son conocidos como agentes formadores de espuma o sustancias activas al azul de metileno. Las tecnologías recomendadas para llevarlos al nivel de 0.5 recomendado por la Norma COGUANOR NGO 2900 son las siguientes:

- Cloración
- Carbón activado
- Osmosis inversa
- Ozonización (19)

2.4.4 Reducción de detergente por medio de carbón activado

El carbón activado es un material fabricado a partir de compuestos de carbono, con propiedades adsorptivas; la actividad describe la capacidad del adsorbente para adsorber adsorbato. Se entiende por adsorbente el medio en donde se realiza el proceso de adsorción y adsorbato el compuesto que es adsorbido. (20)

El carbón activado remueve contaminantes orgánicos del agua por el proceso de adsorción, atrayendo y acumulando el adsorbato sobre la superficie, adicionalmente es un material carbonáceo sujeto a oxidación selectiva para producir una estructura altamente porosa y para proveer una inmensa área superficial. (21)

La gran área superficial del carbón activado, por unidad de masa, lo hace uno de los adsorbentes más usados en tratamiento de agua. El carbón granular posee áreas superficiales de 500 a 1400 m² por gramo de carbón, con diámetro de poros entre 10⁻⁷ y 10⁻⁵ cm. (22)

La sorción es un proceso que incluye la **adsorción y la absorción**. Se refiere al movimiento de un componente de una fase para acumularse en otra mediante adsorción y absorción. En general existen tres tipos de adsorción; física, química y de intercambio. La adsorción física no es específica y se debe a la acción de fuerzas débiles de atracción entre moléculas, como las fuerzas de Van der Waals, en tal caso, la molécula adsorbida tiene movimiento libre sobre la superficie, el sólido adsorbente y no está unida a un sitio específico; puede condensarse y formar varias capas superpuestas sobre la superficie del adsorbente y por lo general es reversible. (23)

La adsorción química se debe a fuerzas mucho más potentes, como las que conducen la formación de compuestos químicos; el compuesto adsorbido forma una capa monomolecular sobre la superficie del adsorbente y las moléculas no son libres de moverse de un sitio a otro; cuando la superficie está cubierta por material adsorbido, la capacidad del adsorbente está prácticamente agotada. La adsorción química no es, generalmente reversible y para remover el material adsorbido se debe calentar el adsorbente. (24)

La adsorción de intercambio, se usa para describir la atracción eléctrica entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, como ocurre en el intercambio iónico. (25)

Estas características permiten utilizar al carbón activado como medio para la reducción de detergentes.

Dentro de los contaminantes del agua que se eliminan con carbón activado están los surfactantes y los detergentes. (26)

3. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados del trabajo experimental, realizados durante 8 semanas, al agua denominada tipo “B”.

Tabla I. Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua tipo “B”. Molino de Las Flores II

PRUEBA No. 1 19/03/02			
PARÁMETRO	AGUA DEL POZO	AGUA FILTRO DE ARENA-VERDE Y CARBÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Hierro (mg/L)	0.3	0.04	86.6
Manganeso (mg/L)	3.4	0.1	97.72
Detergente (mg/L)	5.1	0.73	87.4

Tabla II. Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua tipo “B”. Molino de Las Flores II

PRUEBA No. 2 15/04/02			
PARÁMETRO	AGUA DEL POZO	AGUA FILTRO DE ARENA-VERDE Y CARBÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Hierro (mg/L)	0.27	0.06	77.7
Manganeso (mg/L)	3.2	0.1	96.9
Detergente (mg/L)	4.1	0.70	82.9

Tabla III. Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua tipo “B”. Molino de Las Flores II

PRUEBA No. 3 16/05/02			
PARÁMETRO	AGUA DEL POZO	AGUA FILTRO DE ARENA-VERDE Y CARBÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Hierro (mg/L)	0.12	0.02	83.3
Manganeso (mg/L)	3.2	0.1	96.9
Detergente (mg/L)	3.93	2.58	34.4

Tabla IV. Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua tipo “B”. Molino de Las Flores II

PRUEBA No. 4 22/05/02			
PARÁMETRO	AGUA DEL POZO	AGUA FILTRO DE ARENA-VERDE Y CARBÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Hierro (mg/L)	0.15	0.02	86.6
Manganeso (mg/L)	2.7	0.0	100
Detergente (mg/L)	2.88	0.366	87.4

Tabla V. Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua tipo “B”. Molino de Las Flores II

PRUEBA No. 5 22/06/02			
PARÁMETRO	AGUA DEL POZO	AGUA FILTRO DE ARENA-VERDE Y CARBÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Hierro (mg/L)	0.11	0.01	90.91
Manganeso (mg/L)	3.1	0.1	96.77
Detergente (mg/L)	2.79	0.538	80.71

Tabla VI. Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua tipo “B”. Molino de Las Flores II

PRUEBA No. 6 16/07/02			
PARÁMETRO	AGUA DEL POZO	AGUA FILTRO DE ARENA-VERDE Y CARBÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Hierro (mg/L)	0.11	0.01	90.91
Manganeso (mg/L)	3.1	0.1	96.77
Detergente (mg/L)	2.79	0.538	80.72

Tabla VII. Parámetros de hierro, manganeso y detergente para el agua tipo “B”. Molino de Las Flores II

PRUEBA No. 7 14/07/02			
PARÁMETRO	AGUA DEL POZO	AGUA FILTRO DE ARENA-VERDE Y CARBÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Hierro (mg/L)	0.19	0.02	89.50
Manganeso (mg/L)	2.9	0.10	96.55
Detergente (mg/L)	1.08	0.77	24.22

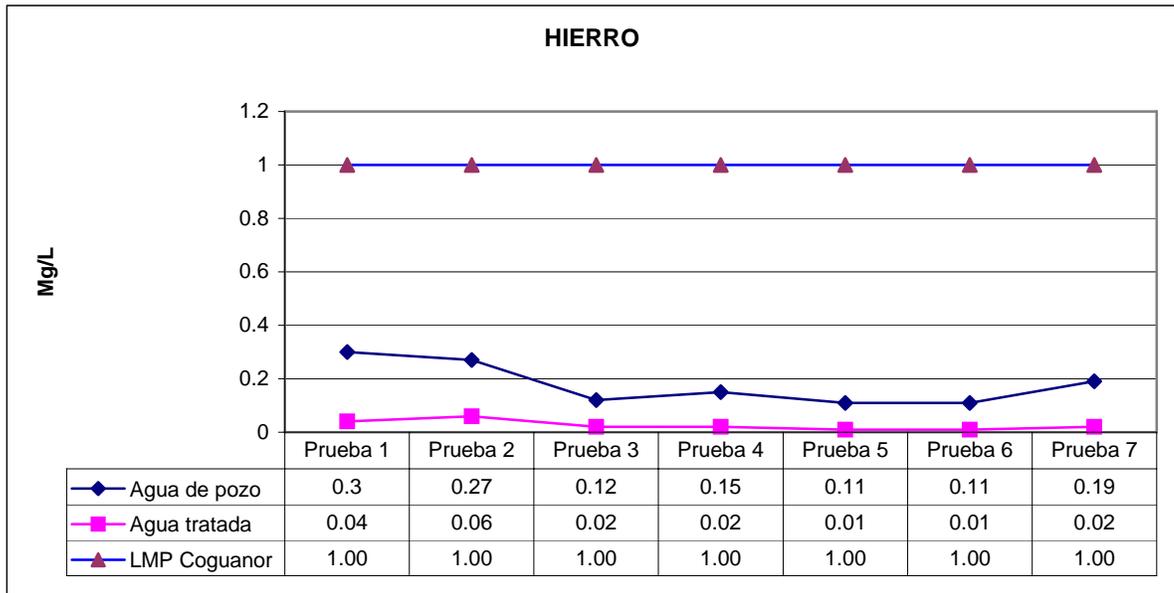
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los últimos 10 años, la demanda de agua potable se ha incrementado en la ciudad capital, debido al aumento acelerado de la población, ésto ha provocado que en algunos casos, el agua proveniente de un pozo, presenta características físicas y químicas, que no satisfacen los niveles de calidad requeridos para agua de consumo humano.

En el apéndice dos se muestran los resultados obtenidos por medio de análisis físico y químico del agua proveniente del pozo 1 de la Colonia Molino de Las Flores. Para la obtención de estos resultados, se realizó un monitoreo durante 8 semanas, durante las cuales, se tomó muestras de agua, tanto del pozo como después del tratamiento con arena verde y carbón activado, y llevadas al laboratorio para hacerles análisis de hierro, manganeso y detergente.

A partir de los resultados presentados en el capítulo 3, para cada uno de los contaminantes, se puede afirmar que la presencia de hierro, aunque no está fuera de los parámetros requeridos para agua potable, se disminuyó a niveles menores de la concentración inicial del agua del pozo (Ver Fig. 1), con lo cual se mejora la calidad del agua y se reduce el riesgo de oxidación del hierro; y por tanto, la formación de óxido férrico, el cual se manifiesta como un sedimento café y da una apariencia rojiza al agua. La reducción del hierro fue a niveles muy por debajo del LMP, que es de 1 ppm; con un promedio de 0.03 en las pruebas realizadas (Ver Fig. 4).

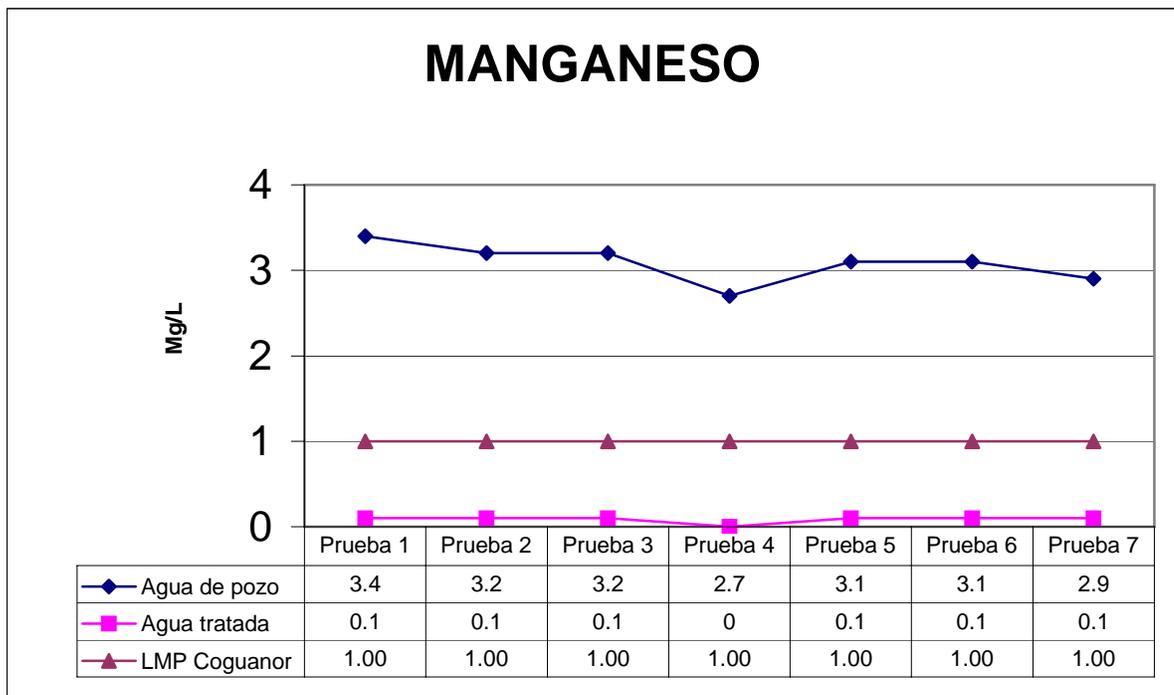
Figura 1. Concentración del hierro en el agua tipo “b” antes y después del tratamiento con el filtro y el IMP



El contenido de manganeso en el agua del pozo, presenta un valor promedio de 3.08 ppm; sin embargo se alcanzó el valor más alto de 3.4 en una de las tomas de muestra. La variación del manganeso se mantiene relativamente constante, durante las 8 semanas. La presencia alta de manganeso en el agua, luego de realizarse un proceso de oxidación a través de la dosificación de cloro y la acción del oxígeno del aire, genera un sedimento negro, el cual es depositado en la tubería de distribución que reduce el diámetro de la tubería, y provoca manchas en los sanitarios y en la ropa, especialmente la ropa blanca. El sabor que adquiere el agua es un sabor metálico. El agua se considera no apta para consumo humano. La reducción del manganeso a niveles permitidos por la norma COGUANOR, por medio de la oxidación con arena verde, (como puede observarse en la figura 2), alcanza un valor promedio de 0.1 ppm. Este valor está en todos los casos por debajo del LMP de 1 ppm (Ver Fig. 5). El agua, luego de reducirse el hierro y el manganeso, presenta una

aparición de menor turbidez. El sabor metálico desaparece, la presencia de cloro en el agua, por efecto de oxidación que tiene sobre el manganeso, causa una coloración café oscuro en el agua, después de reducirse el manganeso, la reacción ya no se realizaba, y el agua quedaba clara aún dosificando una buena cantidad de cloro; esta prueba nos indica que el contenido de manganeso ha disminuído. Se puede afirmar que la eficiencia de la reducción del manganeso por medio de la arena verde es de un 97.37%. Es importante indicar, que después de los tres monitoreos, se realizó un proceso de regeneración con permanganato de sodio, con el objeto de reactivar la capacidad de oxidación de la arena verde. Esta acción permite mantener su capacidad efectiva de oxidación tanto para el hierro como para el manganeso.

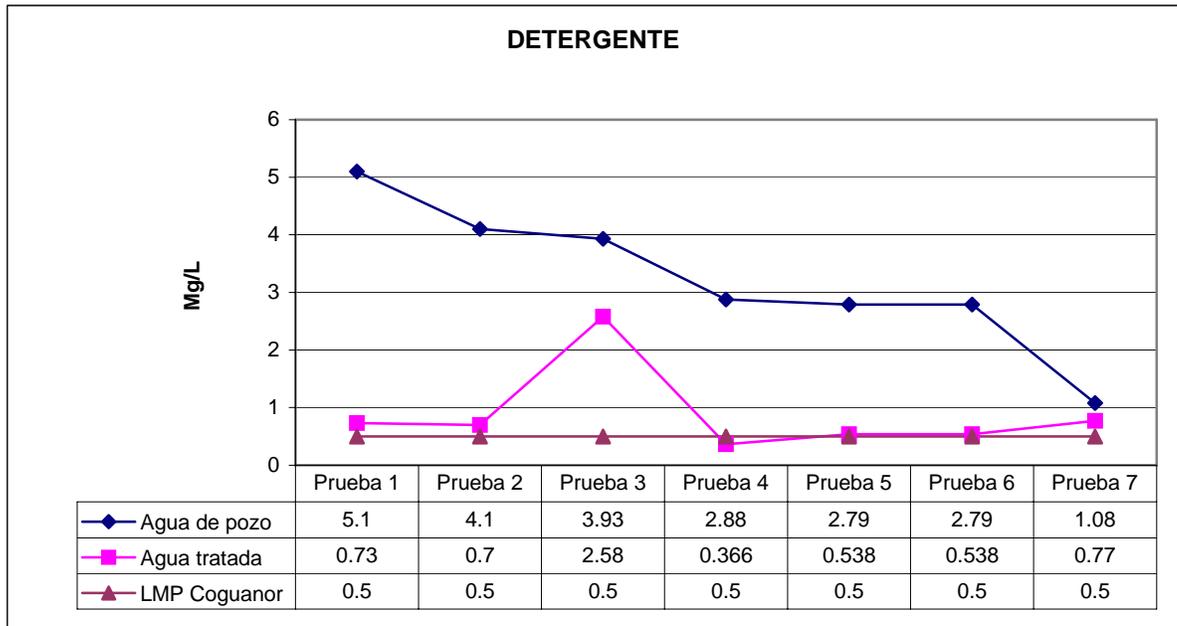
Figura 2. Concentración del manganeso en el agua tipo “b” antes y después del tratamiento con el filtro y el LMP



Después de la eliminación de hierro y el manganeso, el agua aún no cumple con los requisitos estéticos, ya que la presencia de espuma en la superficie tanto del tanque de captación, como en las pilas de las casas, es considerable.

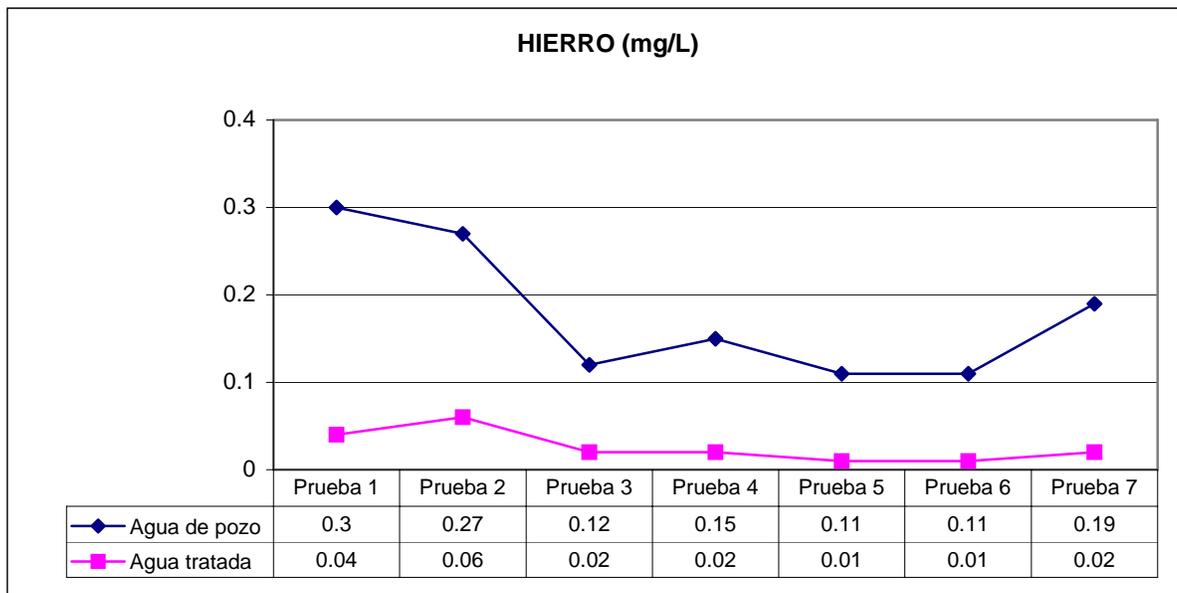
El contenido de detergente obtenido en las pruebas de monitoreo en el agua de la columna de manganeso, presentó variaciones significativas, ya que de un valor inicial de 5.1 ppm, se llegó a un valor de 1.08 ppm, una causa que explica este fenómeno, es que durante las tomas de muestra hubo lluvia, en algunas ocasiones, ésto permite que exista una mayor percolación de agua hacia los mantos acuíferos e incrementa el volumen de agua, y por lo tanto, los niveles de concentración de minerales y contaminantes presentan valores muy variables. Se observa que la variación es mayor con la presencia de detergente que con la presencia de hierro y manganeso (Ver Fig. 3). El detergente es un contaminante causado por un factor de contaminación ambiental y la presencia de hierro y manganeso es un contaminante causado por las características propias del suelo en donde fue perforado el pozo y obedece su presencia a reacciones naturales, por la presencia de dióxido de carbono del agua y la composición de los minerales del suelo. Aún con el valor más bajo de detergente de 1.08 ppm, la presencia de espuma era evidente en el agua.

Figura 3. Concentración del detergente en el agua tipo “b” antes y después del filtro y LMP



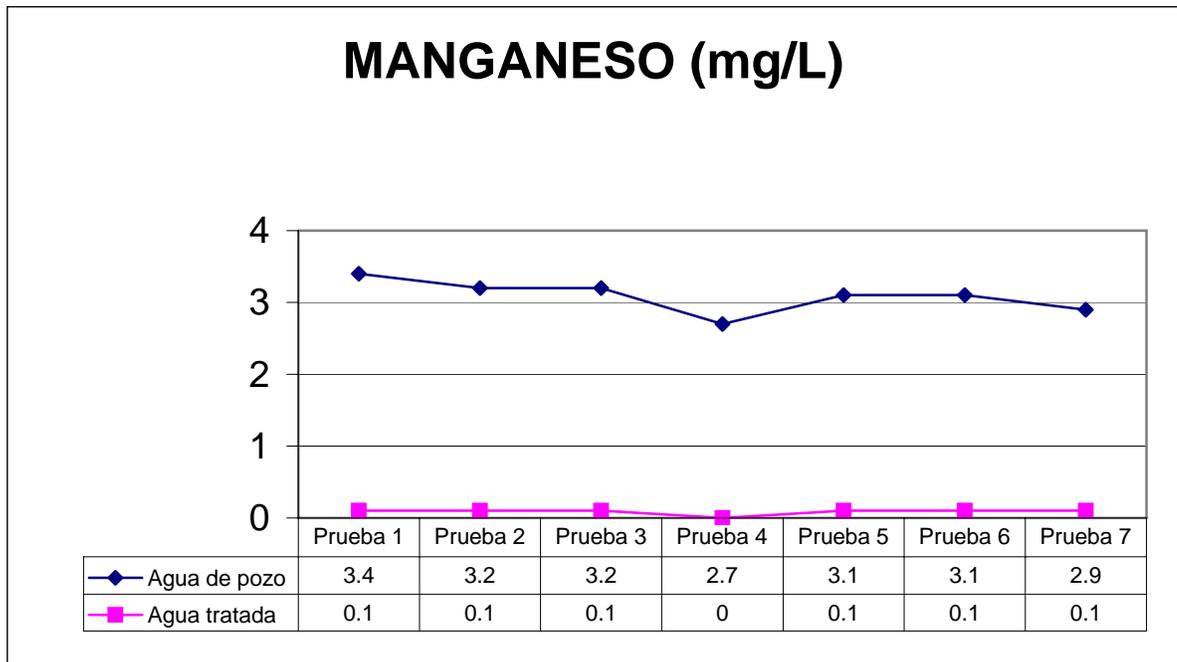
La columna de carbón granular, seleccionada como medio de reducción del detergente, a través de un proceso de adsorción, fue afectada por algunos factores, que no permitieron lograr la remoción completa del detergente. Estos factores se identifican de la siguiente manera, en las primeras pruebas, la velocidad de flujo fue de 2.0 gpm, este valor es el doble del flujo de diseño recomendado para la columna de carbón activado que es de 1 gpm. Cuando se corrigió la velocidad en el flujo de agua de entrada a la columna de carbón, se logró valores de 0.365 ppm y 0.538, muy cercanos al valor LMP de 0.5 (Ver Fig. 3). La apariencia física del agua no presentó la espuma espesa, sino pequeñas burbujas, que no formaban una espuma permanente y la espuma espesa desaparecía, el sabor del agua era más agradable. El sistema de reducción de detergente fue menos eficiente, logrando una reducción promedio de 68.33% con respecto al agua del pozo (Ver Fig. 6).

Figura 4. Comportamiento del hierro en el agua del pozo y el agua tratada después de la columna de arena verde



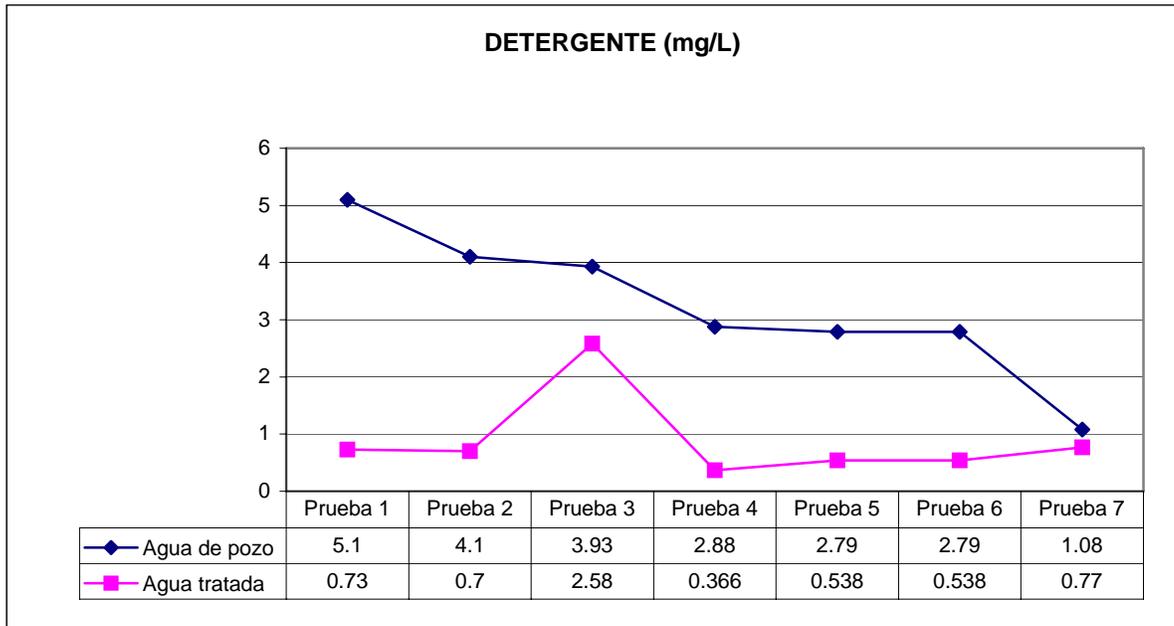
En las características estéticas del agua, la norma establece que el agua debe de ser inodora, incolora y de transparencia cristalina. Si no se cumple con estos parámetros el agua no se puede considerar agua potable.

Figura 5. Comportamiento del manganeso en el agua del pozo y después del sistema de arena verde



Después de aplicar los sistemas de tratamiento de arena verde y carbón activado, el agua presentó una apariencia agradable, cristalina, apta para el consumo humano, especialmente cuando se logró bajar a los niveles muy cercanos a la norma, especialmente en cuanto a la reducción de detergente.

Figura 6. Comportamiento del agua del pozo y el agua tratada, en cuanto al contenido de detergente con carbón activado



CONCLUSIONES

1. El agua del pozo No. 1 de la Colonia Molino de Las Flores, puede ser potable, si se le aplica el método de oxidación de hierro y manganeso, por medio de la arena verde y la reducción de detergente, a través del proceso de adsorción con carbón activado.

El agua sometida a estos dos procesos, alcanzó los parámetros exigidos por la norma COGUANOR NGO 29 001, en los límites máximos permisibles para hierro y manganeso que debe tener el agua considerada apta para el consumo humano. El valor de contenido de detergente, en el agua sometida al tratamiento con carbón activado, estuvo en un 85% muy cerca del LMP de 0.5 ppm, establecido por la norma COGUANOR y en estos casos la espuma del agua no era percibida visiblemente.

2. Es necesario cumplir con las condiciones de operación que el fabricante establece para la arena verde de manganeso (Ver anexo 1) y del carbón activado, para poder alcanzar resultados positivos en la reducción de los contaminantes de hierro, manganeso y detergente.
3. Los resultados obtenidos en la reducción de hierro, manganeso y detergente, por medio de la evaluación de la planta piloto, pueden servir como base para aplicarlos en el tratamiento de todo el caudal del pozo No. 1 y proveer de agua apta para el consumo humano a la Colonia Molino de Las Flores II.

RECOMENDACIONES

1. Con los resultados aceptables obtenidos en el trabajo experimental, para la reducción de hierro, manganeso, se recomienda a la Cooperativa Molino de Las Flores II, implementar un sistema de oxidación de hierro y manganeso, a través de una columna de arena verde.
2. Para reducir a niveles aceptables el contenido de detergente, el cual da una apariencia no estética al agua, se recomienda la instalación de una columna de carbón activado.
3. Para calcular y diseñar el sistema general de tratamiento de agua, debe considerarse como válidas, las condiciones de operación que requiere una columna de arena verde (ver anexo 1), aplicadas en el diseño de la planta piloto (ver anexo 2). Las condiciones más importantes son: velocidad de flujo de servicio con valor de 5 gpm/pie^2 , este valor permite determinar el diámetro que debe de tener el cilindro que contiene la arena verde, para que a esa velocidad de flujo se logre una adecuada oxidación del hierro y manganeso. Otro valor importante en el diseño es el valor de flujo de retrolavado de la arena verde, el cual garantiza que la arena verde, se mantendrá limpia del sedimento de hidróxido de hierro, que se depositaría en su superficie. Si este valor no es tomado en cuenta, la columna de arena verde se irá saturando de sedimento a tal punto que no reducirá con eficiencia el hierro y manganeso presente en el agua. Un tercer valor a contemplar, es dejar un espacio del 50% de la altura de la columna de arena verde, para que exista una expansión adecuada de la misma y contribuya también a la adecuada eliminación del sedimento. Si

la columna tiene 30" de altura, se debe dejar 15" de espacio libre en el cilindro para que se expanda la arena verde.

4. Para garantizar la adecuada operación del sistema de arena verde, es necesario realizar un proceso de regeneración con permanganato de potasio, como lo recomienda el fabricante (ver anexo 1) en la cantidad de 1.5 onzas por cada pié cúbico de arena verde que se encuentre en el sistema.
5. Es recomendable reiniciar el proyecto de tratar todo el caudal de agua del pozo, realizando una evaluación económica del proyecto y proponerlo nuevamente al pleno de la Cooperativa de Agua de Molino de Las Flores II.

REFERENCIAS

1.
OPS/OMS. **Guías para la calidad del agua potable**. Washington, D. C. Publicación Científica No. 506, p. 285-285.
2.
Ibid. p. 286.
3.
Jairo Romero Rojas. **Calidad del Agua** Colombia, Editorial Alfaomega, 19XX p. 113.
4.
OPS/OMS, op. cit., p. 288-289.
5.
Ibid. p. 289.
6.
Ibid. p. 290.
7.
Escuela Politécnica del Litoral. **El agua subterránea y los pozos** Ecuador, Facultad de Ingeniería de Geología, minas y petróleo, 1986. p. 79:80.
8.
Jairo Romero Rojas. **Acuíquímica**, Colombia: Editorial Presencia, 1995 p. 129.
9.
Ibid. op. cit., p. 129.
10.
G. M. Fair y J. C. Geyer: **Ingeniería sanitaria y aguas residuales**. México: Editorial Limusa-Wiley S.A., 1971. p. 66.

11.
Jairo Alberto Rojas. **Acuiquímica**. Colombia: Editorial Presencia, 1995.
P. 129.
12.
Miguel Rígola Lapena. **Aguas de proceso y residuales** México:
Alfaomega 1999 p. 7.
13.
WQA “**Safe drinking water asc, 2000**”.
14.
Ibid., op. cit., 9.
15.
Folleto de Sistegua, filtración con arena manganeso. marzo 1998, p. 8.
16.
Ibid. op. cit., p. 10.
17.
Ibid. op. cit., p. 11.
18.
Raymon W. Ellis “**Water water conditioning and purification**”, January
1997, p. 54.
19.
Ibid. op. cit., p. 56.
20.
Jairo Alberto Romero Rojas. **Purificación de agua**. Colombia: Editorial
Escuela Colombiana de Ingeniería, noviembre 2000 p. 310.
21.
Ibid. op. cit. p. 315.
22.
Ibid. op. cit., p. 314.
23.
Boletín Técnico No. 2 Sisteagua, México 1999, p. 8.

24.

Jairo Alberto Romero Rojas. **Purificación de agua**. Colombia, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, noviembre 2000 p. 312.

25.

Ibid. op. cit., p. 315.

26.

Ibid., op. cit., p. 314.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.S.T.M. **Manual de aguas para usos industriales**. 2da. edición, México, Limusa, 1982.
2. Departamento de Sanidad del Estado de New York. **Manual de tratamiento de agua**. 3ª. Edición, México 1987.
3. Dos Santos, Divino Francisco. **Tecnología de tratamiento de agua**. 3ª. Edición, Brasil 1985.
4. Criterios relativos a la salud y otra información de base. **Guías para la calidad del agua potable**, Vol. 2. Publicación científica No. 506. O.P.S. 1987.
5. Mc Gowan, Wes. **Procesos de agua residual**. Estados Unidos, Water Quality Association.
6. NALCO. **Manual de agua**. México, Mcgraww Hill, tomo II.
7. Norma COGUANOR NGO 29 001. **Especificaciones para agua potable**. Guatemala, 2000.
8. Romero Rojas, Jairo. **Calidad del agua**. Colombia, Alfaomega, 1999.
9. Romero Rojas, Jairo. **Purificación del agua**. Colombia, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.
10. Romero Rojas, Jairo. **Acuiquímica**. Colombia, Editorial Presencia. 1995.
11. Rigola Lapena, Miguel. **Aguas de proceso y residuales**. México, Alfaomega, 1999.

APÉNDICE

CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO

Para la construcción de la planta piloto, especialmente el cilindro que contiene la arena verde, se tomó en cuenta las condiciones de operación de la arena verde (ver anexo), sobre todo para encontrar el diámetro que debe de tener el cilindro, para que la velocidad de flujo de servicio por área, sea la adecuada para la remoción de hierro y manganeso.

Los valores considerados para el diseño son los siguientes:

- Velocidad de flujo de servicio: 3-5 gpm/pie²
- Flujo de operación del sistema de arena verde: 2 gpm
- Profundidad de la columna de arena verde: 30 pulgadas.

Para calcular el diámetro del cilindro se aplica la siguiente fórmula:

$$D = (\text{Flujo de operación}/\text{Flujo de servicio} \times 3.1416)^{1/2} \times 24$$

Donde D: Es el diámetro del cilindro que contiene la arena verde en pulgadas.

Al sustituir los valores en la fórmula, se obtiene un diámetro de 8.5 pulgadas, para el cilindro. La altura de el lecho de arena verde recomendado mínimo es de 36 pulgadas, de este valor es recomendable dejar un 50% de espacio libre sobre el lecho de la arena, para que pueda expandirse la arena verde. Esto significa que se tiene que sumar 18 pulgadas adicionales a las 36 pulgadas de altura para obtener una altura total del cilindro de 54 pulgadas.

También se diseñó el sistema para que, antes de cada toma de muestra, se realizara un proceso de retrolavado, el cual consiste en introducir agua por la parte inferior del equipo, para expandir el lecho de arena verde y evacuar sedimento acumulado en la parte superior. Durante el proceso experimental, se realizaron dos regeneraciones con permanganato de potasio.

Para el sistema de carbón activado se utilizó un filtro de carbón granular de 10 pulgadas de alto, con un flujo de diseño de 1 gpm. El carbón activado, fue instalado posterior al sistema de arena verde, para reducir el riesgo que la oxidación del hierro y manganeso, por la presencia de oxígeno en el agua, produjera sedimento en la columna de carbón activado. (ver figura 7).

Figura 7. Sistema de arena verde y carbón activado

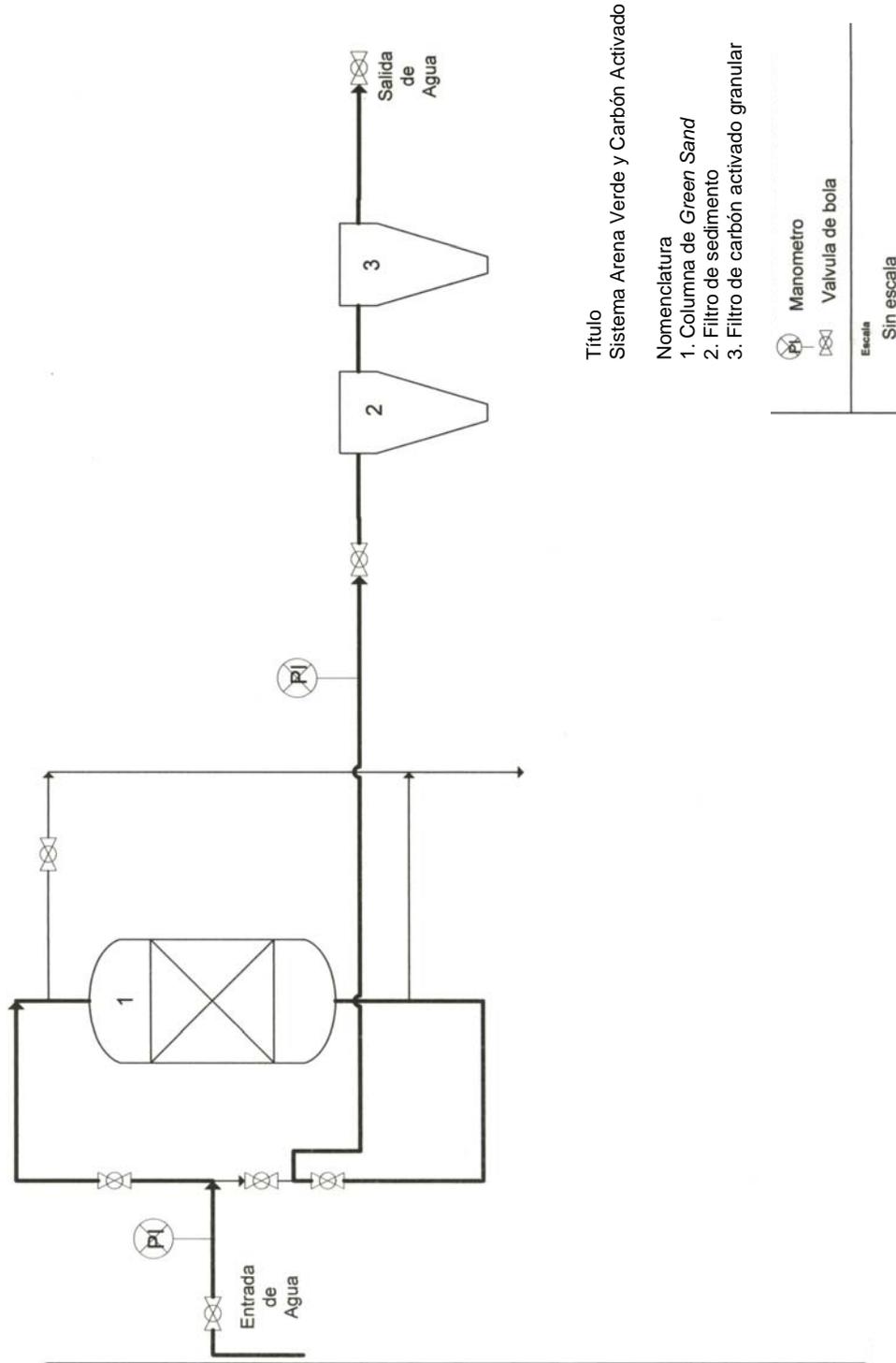


Figura 8. Sistema de tratamiento de agua columna de glaucomita y carbón activado

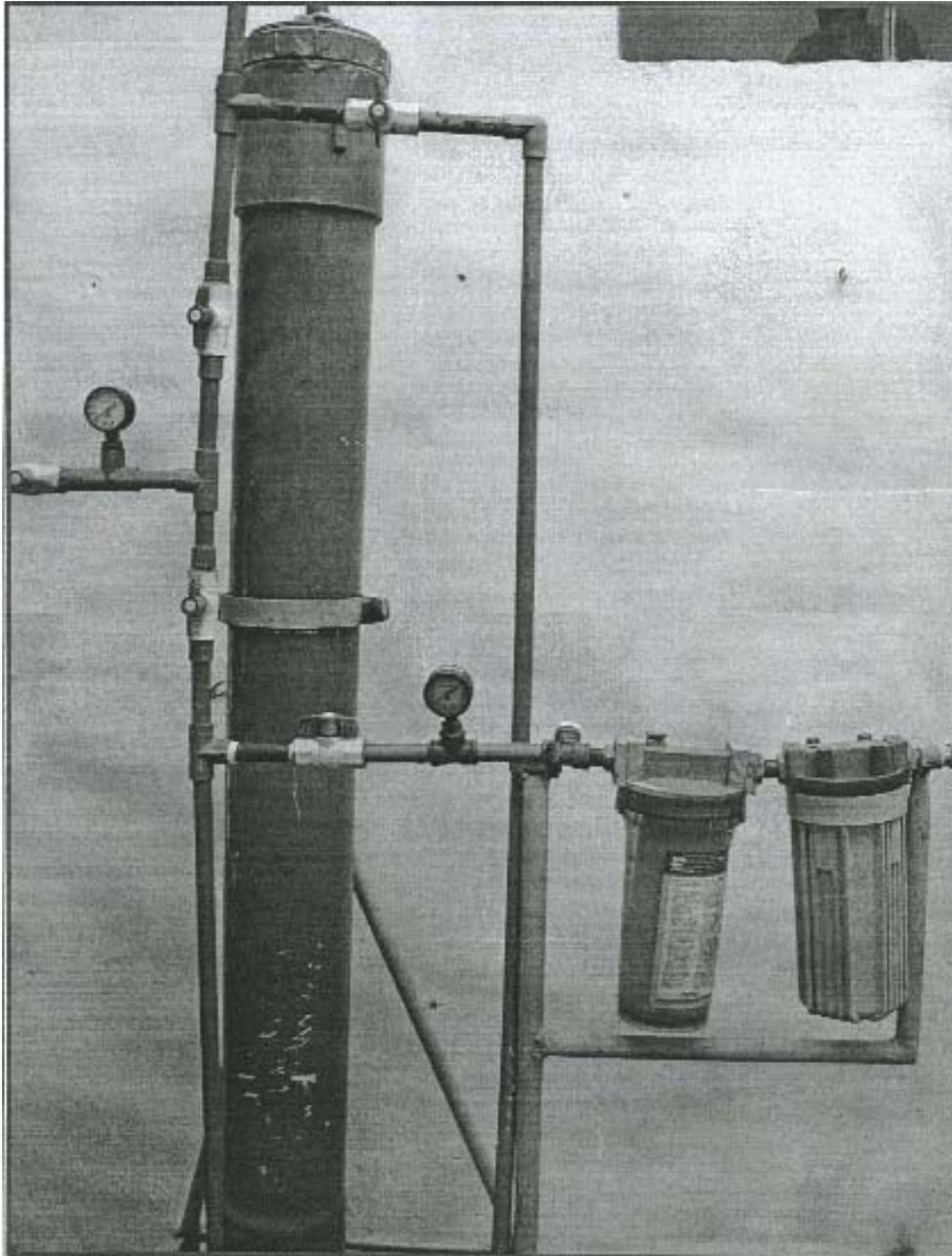
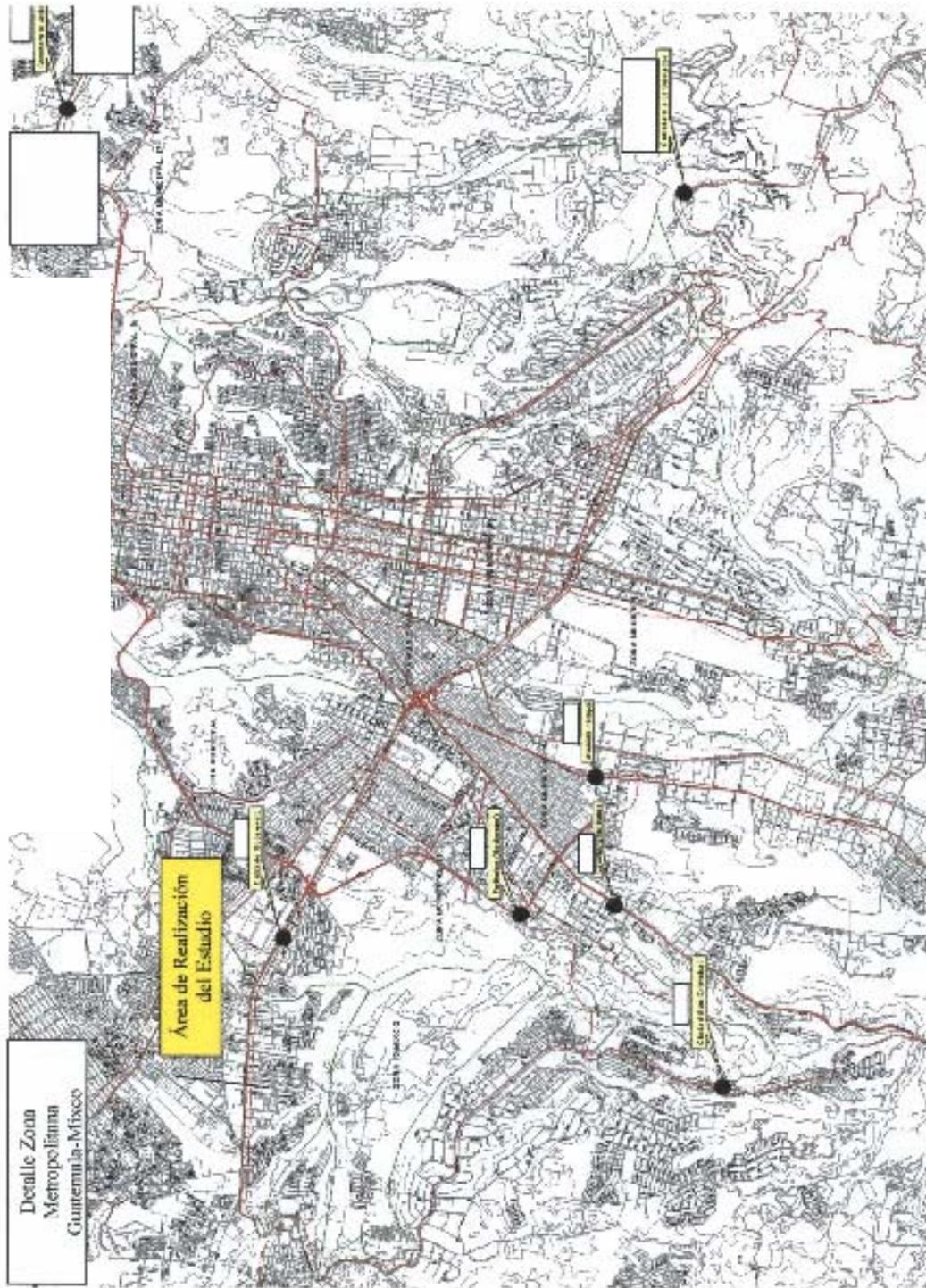


Figura 9. Ubicación del pozo de la colonia Molino de Las Flores II



ANEXO
ESPECIFICACIONES DE LA ARENA VERDE DE MANGANESO DADAS POR
EL FABRICANTE

VENTAJAS

- ❑ Reducción de hierro arriba de un amplio rango de pH.
- ❑ Efectiva reducción de sulfuro de hidrógeno en suma con el hierro y/o manganeso.
- ❑ No tienen efectos dañinos la dosificación de cloro.
- ❑ Baja atrición para una larga vida de la arena.

PROPIEDADES FÍSICAS

- ❑ Color: Negro
- ❑ Densidad: 85 lbs/pie²
- ❑ Gravedad específica: 2.4-2.9
- ❑ Tamaño efectivo: 0.30-0.35 mm
- ❑ Tamaño de malla: 16-60
- ❑ Pérdida por atrición por año: 2%

CONDICIONES DE OPERACIÓN

- ❑ Rango de pH del agua: 6.2-8.5
- ❑ Temperatura máxima del agua: 80°F / 26.7°C
- ❑ Profundidad de la cama: 30 pulgadas

- Borda libre: 50% de la profundidad de la cama (mínimo)
- Regeneración: 1.5 – 2.0 onzas de K_2MnO_4 por peso por pie cúbico
- Flujo de servicio: 3-5 gpm/pie², 8-10 gpm/pie² posible flujo intermitente
- Flujo de retrolavado: 10-12 gpm/pie²
- Expansión en el retrolavado: 40% de la profundidad de la cama. (min)
- Límite máximo de hierro (Fe^{++}) o manganeso (Mn^{++}) en la fuente de agua: 15 ppm.
- Límite máximo de sulfuro de hidrógeno (H_2S): 5 ppm.