

Tratamiento alternativo para la remoción de hierro en agua de abastecimiento municipal

Manuel Gerardo ALONSO GUTIÉRREZ, María del Rosario ARNAUD VIÑAS y Raúl ROJAS CHÁVEZ

Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral, CIIDIR, Unidad Oaxaca, Calle Hornos 1003, 71230 Oaxaca, México. Correo-e: marnaud@ipn.mx

RESUMEN

En el agua de abastecimiento del Municipio de Nazareno, Etlá; en Oaxaca, México, se hallaron concentraciones de 2.2 mg/L de hierro que se atribuyen fundamentalmente a la generación de residuos orgánicos por la actividad agroindustrial en la zona. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano) el nivel máximo permisible de hierro para aguas de abastecimiento es 0.30 mg/L y pH 6.5-8.5. Las elevadas concentraciones de hierro están provocando altos costos de mantenimiento por el deterioro del sistema de conducción del agua además de constituir un riesgo para la salud de los usuarios del servicio. Se requiere de la aplicación de un sistema de tratamiento de agua efectivo, de bajo costo y fácil operación para el personal de las áreas municipales. Los propósitos del estudio fueron: 1) Cuantificar los cambios en la concentración de hierro en el agua de abastecimiento municipal en distintos puntos de la tubería de conducción; y 2) Evaluar la eficacia del hipoclorito de sodio (NaOCl) comercial al 12.3%, en la remoción del hierro contenido en el agua.

Un 75.9% del hierro presente en el agua precipita durante su trayectoria desde el pozo profundo de extracción al punto más lejano de abastecimiento (2 km). Se probaron distintas concentraciones de NaOCl, para oxidar y precipitar el hierro. La concentración óptima fue de 3.26 mg/L de NaOCl, después de 5 minutos de agitación, 60 minutos de reposo y un tiempo de precipitación de 30 minutos. La remoción obtenida con esta concentración fue del 98.6% permaneciendo un hierro residual <0.03 mg/L.

INTRODUCCIÓN

Contaminación del agua por hierro

Un 4.7% de la corteza terrestre está compuesta de hierro. La concentración de hierro en mantos acuíferos puede variar de 1 µg/L a 2 mg/L. y puede tener su origen en minerales ferrosos de rocas y suelos. No obstante, la contaminación por residuos orgánicos y, ocasionalmente, la corrosión de accesorios metálicos en las líneas de conducción de agua de abastecimiento municipal contribuyen de manera importante a la incorporación de este metal a los sistemas de distribución de agua. El hierro insoluble puede llegar a fuentes de abastecimiento de agua en forma soluble después de sufrir procesos biológicos en el suelo derivados de la acción bacteriana sobre la materia orgánica convirtiéndola

finalmente en CO₂ y H₂O. Así, una gota de lluvia perderá oxígeno progresivamente a través de su trayectoria del suelo hasta el nivel freático. Una vez que las bacterias han consumido el oxígeno del agua, buscan otra fuente de oxígeno tomándolo de uno de los óxidos metálicos más frecuentes en el suelo: el Fe₂O₃, insoluble, liberando hierro reducido al ion ferroso (Fe²⁺), soluble en agua. Lo anterior explica, en parte, la concentración baja de oxígeno de las aguas subterráneas conocidas como "reducidas", con propiedades como clara e incolora, olor y sabor metálicos y a veces con olor a H₂S. Cuando el agua reducida se pone en contacto con el aire, el hierro se oxida rápidamente formando flóculos de color marrón que precipitan posteriormente. Este proceso se observa en lixiviados de vertederos, en agua con abonos y en efluentes de fosas sépticas, así como de

industrias lácteas, entre otros; de manera que la concentración de hierro puede ser un indicador de contaminación de aguas subterráneas, que pueden llegar a presentar niveles muy superiores a 1 mg/L (KIELY, 1997).

Hierro en la salud humana

El cuerpo humano de un adulto sano contiene de 3 a 5 g de hierro, nutriente esencial para la vida animal (LIEU y cols., 2001). El hierro es fundamental en la formación de hemoglobina y mioglobina, de colágeno y elastina, de enzimas involucradas en procesos intracelulares de óxido-reducción y promueve la formación de carnitina (HALLBERG, 2001). El citocromo p450 es un sistema enzimático dependiente del hierro que ayuda al hígado a destruir tóxicos químicos. El hierro favorece la acción de la enzima catalasa que degrada el peróxido de hidrógeno a agua y oxígeno, limitando así su poder de oxidación (EMERIT y cols., 2001); participa en la síntesis de desoxirribosa, así como de neurotransmisores como dopamina, serotonina y norepinefrina (ROUAULT, 2001 y CHIUEH, 2001); promueve la síntesis de formas altamente reactivas de oxígeno con función bactericida; y ayuda al óptimo funcionamiento de neutrófilos y a la producción de linfocitos-T (BEARD, 2001).

No obstante, el hierro libre es un poderoso oxidante y se ha postulado que en niveles altos puede promover reacciones de radicales libres, formas altamente reactivas de oxígeno, que por sí mismos dañan la pared de arterias y el tejido cardíaco, además de que actúan sobre lipoproteínas de baja densidad (LDL), dañinas, que en estado de oxidación se adhieren con mayor facilidad a las paredes arteriales. Una ingesta elevada de hierro de manera crónica se ha asociado a mayor riesgo de enfermedad coronaria e infarto; a supresión del sistema inmunológico; a producción de un tinte color bronce o grisáceo en la piel; a aparición de trastornos como cefalea, fatiga, desórdenes gastrointestinales como estreñimiento y náuseas; y a incremento en el riesgo de cirrosis hepática, fibrosis del páncreas y diabetes (ROY y ANDREWS, 2001). Adicionalmente, se ha asociado a cáncer, principalmente de esófago y de vejiga, así como a tumores fibroides, presión arterial elevada, hipertrofia de próstata y artritis (AREZZINI y cols., 2003).

El consumo elevado de hierro en el hombre puede derivar del agua, alimentos, suplementos dietéticos o utensilios de cocina. El hierro dietético proviene principalmente de productos de origen animal, con hierro HEM, cuya absorción a nivel intestinal es superior (10-20%), en comparación con el hierro de plantas y hojas verdes del cual se absorbe un 3% aproximadamente (LEUNG y CHAN, 2001). Son más susceptibles a la acumulación de hierro los hombres adultos (>19 años) y las mujeres en edad posterior a la menopausia (>51 años) o aquellas con histerectomía. La recomendación diaria de estos

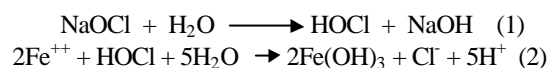
grupos de población es de 8 mg./día, si se consume una dieta mixta con fuentes de hierro de origen animal y vegetal; mientras que la recomendación actual para mujeres de 19-50 años es de 18 mg./día (GROFF y cols., 1995). Las recomendaciones para el consumo diario de hierro establecidas por el *Food and Nutrition Board of the Institute of Medicine (National Academy of Sciences)* 2001, en Estados Unidos, son de 8 mg para niños y niñas de 9-13 años, 11 mg para niños de 14-18 años, 15 mg para niñas de 14-18 años, 27 mg para embarazadas y de 10 mg./día para madres lactantes.

Procesos de remoción de hierro en agua

Existen tres métodos generales para la eliminación de hierro en agua: ablandamiento con cal, proceso de intercambio de base y proceso de oxidación. El método a elegir depende de las características del agua y la naturaleza del compuesto. El ablandamiento con cal se utiliza cuando, además de remover el hierro, es necesario ablandar el agua por grandes concentraciones de calcio y magnesio, por lo que se generan cantidades importantes del lodo. El proceso de intercambio de base requiere un lecho de zeolita natural con aplicación de presión sobre el lecho y regeneración del mismo con NaCl o CaCl₂ según el caso. La implementación de estos métodos requiere de condiciones específicas de operación y personal capacitado, por lo que se dificulta en localidades rurales.

En el caso de contaminación de aguas subterráneas por hierro ferroso o soluble en concentraciones del orden de 2 a 3 mg/L, la opción es la remoción por oxidación con un compuesto oxidante más poderoso que el aire, en un rango de pH entre 7 y 8.5, ya que en condiciones de cierta alcalinidad, el hierro es insoluble y su concentración se puede reducir a menos de 0.3 mg/L. Este proceso de oxidación o de coagulación es sólo una parte del tren de tratamiento de agua para consumo humano, que deberá continuarse con las etapas de sedimentación y filtración. Esta última etapa puede incluir, además, el ajuste de pH y desinfección (POWELL, 1981).

En aguas naturales que tienen alcalinidades significantes (pH de 6.5-9.0), con alto contenido de carbonatos ferrosos, solubles, la remoción de hierro depende de la oxidación de estas formas de (Fe⁺⁺) para obtener Fe⁺⁺⁺ como hidróxido férrico Fe(OH)₃, insoluble y que precipita en un rango de pH de 7-10 (STUMM y MORGAN, 1981). En este proceso de oxidación, el hipoclorito de sodio al contacto con el agua produce el ácido hipocloroso (HOCl) que funciona como agente oxidante del hierro (Ecuaciones 1 y 2) (AWWA, 1990).



Los criterios para el sistema de tratamiento son: tiempo de reacción de 5-30 min; tiempo de sedimentación variable hasta alcanzar la clarificación; tamaño típico de antracita para filtración =0.5 mm; tasa de filtración 5-10 gpm/ft²; y grado de retrolavado 15-25 gpm/ft² (AWWA, 1991).

MATERIAL Y MÉTODOS

Localización y características de la zona de estudio

El Municipio de Nazareno, Etlá, tiene una localización geográfica de 17° 11' latitud norte, 96° 49' longitud oeste a 1,600 m.s.n.m. de altitud. Cuenta

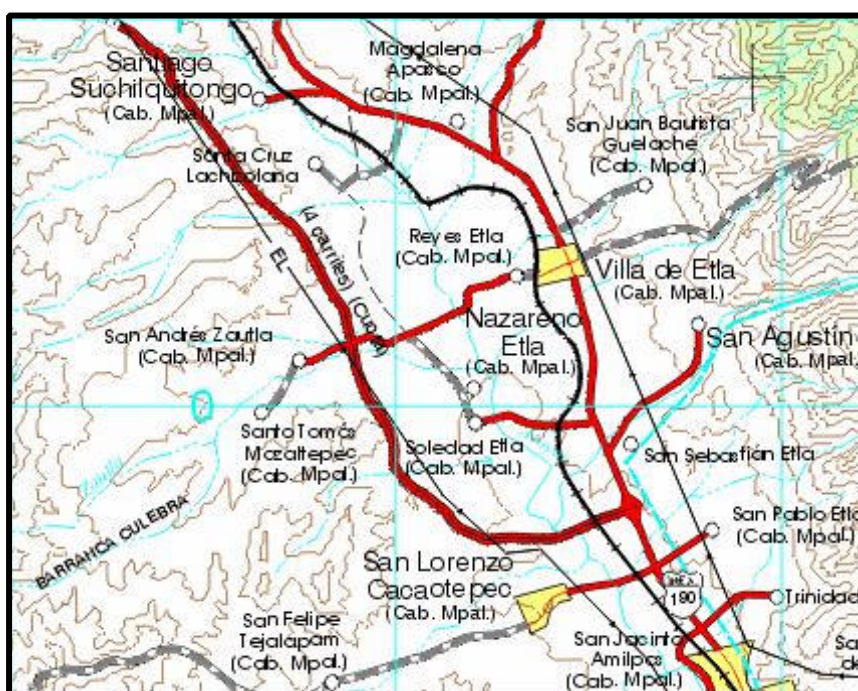


FIGURA 1. Localización de la zona de estudio.

con 3,347 habitantes en tres barrios conocidos como: Barrio de abajo, Barrio de en medio y Barrio de arriba (INEGI, 2003). Está ubicado a 13 Km. al poniente de la capital del Estado de Oaxaca, en la región de los Valles Centrales donde se concentra poco más del 25% de la población estatal que es de 3,5 millones de habitantes (Figura 1).

Se han descrito altos niveles de hierro en la geología del subsuelo de la región (BELMONTE, 2000), que además presenta una actividad agropecuaria importante para la producción de leche y queso. Tan sólo en los municipios de Nazareno, Guadalupe, Reyes y Villa de Etlá se encuentran 63 unidades productivas que generan importantes cantidades de materia orgánica por residuos sólidos y aguas residuales (INEGI, 1999).

El pozo profundo abastece agua al municipio por medio de 449 tomas domiciliarias. Se hallaron

concentraciones de 2.2 mg/L de hierro, que se atribuyen fundamentalmente a la solubilización de óxidos de hierro ya presentes en el subsuelo, como producto de la acción bacteriana sobre residuos orgánicos generados por la actividad agroindustrial en la zona. Según la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1, 1994), el nivel máximo permisible de hierro para aguas de abastecimiento es 0.30 mg/L. El deterioro de la línea de conducción del agua de abastecimiento debido a incrustaciones de hierro que obstruyen la tubería se hace más crítico en zonas de baja velocidad y origina gastos de mantenimiento correctivo superiores a 6000 dólares por año, además de otros costos no cuantificados que incluyen suspensión del servicio de agua, excavaciones, obra

civil y el gasto sanitario por las afectaciones en la salud de los habitantes que la beben (MUNICIPIO DE NAZARENO, ETLA, 2002).

Extracción y manejo de muestras

Los puntos de muestreo se determinaron después de realizar un análisis de campo detallado para verificar la ubicación de la fuente de abastecimiento, las líneas de conducción, las características del mantenimiento de estas líneas y recopilación de información municipal.

Se tomaron muestras de agua en los puntos donde inicia la red de abastecimiento de los tres barrios para conocer el comportamiento del hierro a lo largo de la red de distribución. Durante la misma jornada, 15 de Mayo de 2002, se obtuvieron muestras de agua

en cuatro puntos de la tubería de conducción: 1°. Al interior del pozo profundo de abastecimiento ubicado en el margen derecho del Río Zautla (río de flujo limitado que se incrementa durante la época de lluvias –mayo a septiembre); 2°. En el punto de inicio de la red de abastecimiento en el Barrio de abajo, a 0.8 Km del pozo de abastecimiento; 3° En el punto de inicio de la red de abastecimiento en el Barrio de en medio, a 1.5 Km del pozo de abastecimiento; y 4° En el punto de inicio de la red de abastecimiento en el Barrio de arriba, a 2.0 Km del pozo de abastecimiento. Cada muestra tuvo un volumen de 10 litros. Las 4 muestras fueron colectadas en botellas de polietileno previamente lavadas con ácido nítrico al 50% en agua bidestilada y se transportaron al laboratorio para realizar las pruebas de oxidación correspondientes en la misma jornada. Para la

determinación de hierro en el sobrenadante de cada muestra pre y post-tratamiento, éstas fueron preservadas con ácido nítrico concentrado hasta obtener un pH <2, a temperatura ambiente, para un tiempo de almacenamiento de una semana.

Quantificación de los niveles de contaminación por hierro

Se realizaron determinaciones de hierro por duplicado en cada una de las cuatro muestras extraídas de la tubería de conducción y en las muestras de agua del pozo de abastecimiento tratadas con diferentes dosis de NaOCl. El método de determinación fue el indicado para las concentraciones de hierro en cuestión. Se aplicó el método de espectroscopía de emisión, con plasma de acoplamiento inductivo (PAI) (APHA, AWWA, WPCF, 1992). Las determinaciones se realizaron en un espectrofotómetro de emisión marca PERKIN ELMER.

Análisis de la información

Se describen los valores correspondientes a la media de las dos muestras obtenidas de cada tratamiento y su error estándar (ee). En ningún caso se registró una variabilidad superior a 0.05% entre los valores de los duplicados. En el análisis bivariado entre la concentración de hierro en el sobrenadante de cada muestra (variable respuesta) y la concentración de NaOCl utilizada en el tratamiento de remoción de hierro (variable predictora), se estimó el coeficiente de correlación de Pearson (r) y su nivel de significación estadística (P); finalmente se probó la asociación lineal entre ambas variables estimando el coeficiente de regresión (r^2) así como el cambio

experimentado por la variable respuesta por unidad de incremento de la variable predictora (β_1 e I.C. 95%).

Proceso de remoción de hierro en agua

Para cuantificar la efectividad del NaOCl en la remoción de hierro se dosificaron diferentes cantidades de una solución con 136.53 mg/L de NaOCl, que se obtuvo diluyendo 1 mL de hipoclorito comercial al 12.3% en 1L de agua destilada. Se tomaron 12 sub-muestras de 500 mL de la muestra No. 1, del pozo profundo de abastecimiento. Cada una de estas sub-muestras fue tratada con concentraciones ascendentes de NaOCl para obtener 0.26, 0.54, 0.80, 1.36, 1.62, 1.90, 2.16, 2.44, 2.72, 2.98, 3.26 y 3.52 mg/L de NaOCl. Después de añadir el NaOCl, a cada sub-muestra se le dio un tiempo de agitación de 5 minutos con un probador de jarras tradicional de seis plazas, marca MAYASA con aspas planas de 8 cm. de largo por 4 cm. de ancho, a 50 r.p.m. El tiempo de precipitación fue el transcurrido entre la suspensión de la agitación y la observación de: a) ausencia de turbidez en el sobrenadante; y b) un precipitado sin compactación. Pasado este tiempo se esperó a completar 60 minutos para observar el aspecto de la muestra y determinar pH y concentración de hierro. La ausencia de turbidez en el sobrenadante, como indicador básico de calidad de agua (MARCÓ y cols., 2004) y el aspecto de la muestra a los 60 minutos de tratamiento se determinaron por observación directa. El pH se determinó con un potenciómetro marca HANNA y se tomaron 50 mL del sobrenadante de cada sub-muestra tratada, preservándolas, para determinar hierro por absorción atómica, por duplicado.

TABLA 1. Puntos de muestreo del agua de abastecimiento en el Municipio de Nazareno, Etlá, México, indicando para cada sitio, la concentración de hierro (mg/L) y su error estándar (ee).

MUESTRA	PUNTO DE MUESTREO	VOLUMEN DE MUESTRA (Litros)	HIERRO mg/L (ee)
1	Pozo de abastecimiento	10	2.20 (0.03)
2	Inicio de la red de abastecimiento en el Barrio de abajo a 800 m del pozo de abastecimiento	10	1.74 (0.03)
3	Inicio de la red de abastecimiento en el Barrio de en medio a 1,500 m del pozo de abastecimiento	10	1.50 (0.02)
4	Inicio de la red de abastecimiento en el Barrio de arriba a 2,000 m del pozo de abastecimiento	10	0.53 (0.01)

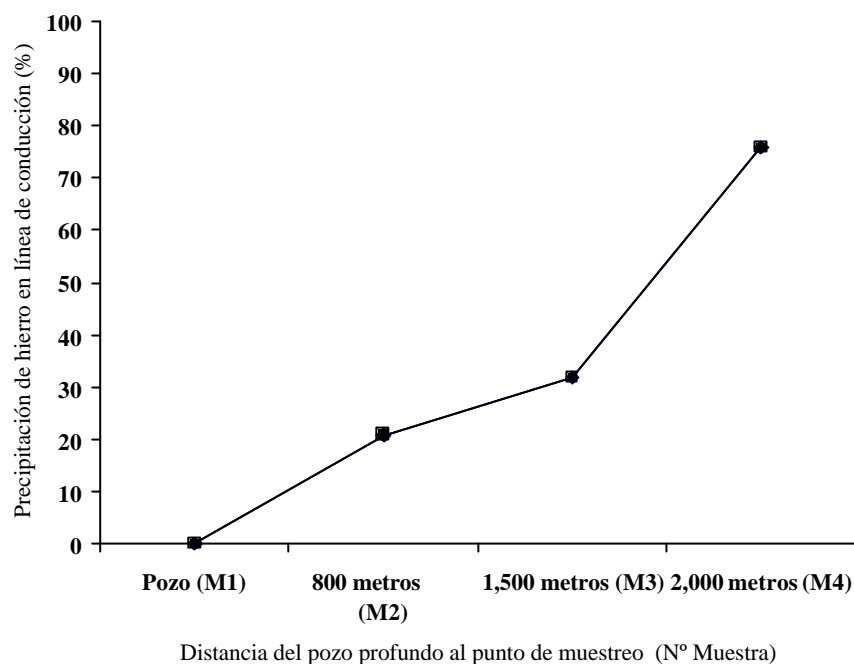


FIGURA 1. Porcentaje de precipitación del hierro (%) en los cuatro puntos de muestreo en la línea de conducción de agua de abastecimiento del Municipio de Nazareno, Etlá, México.

RESULTADOS

Durante su trayectoria del pozo de extracción al punto más lejano de abastecimiento de agua (2 km.), la concentración máxima de hierro fue de 2.2 mg/L y la mínima, de 0.53 mg/L. Las concentraciones de hierro en la red de conducción de agua varían en forma inversamente proporcional a la distancia existente entre el punto de muestreo y el pozo profundo de abastecimiento (Tabla 1).

En el punto más distante al pozo profundo de abastecimiento, se observó un 75.9% de precipitación del hierro presente en el agua (Gráfica 1). No obstante, estos niveles observados en el punto más lejano de la red de distribución (0.53 mg/L) se ubican por encima de 0.3 mg/L, límite máximo que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

Después de aplicar el tratamiento con NaOCl, seguido de 5 minutos de agitación y un tiempo de reposo de 60 minutos, se observó que las concentraciones =0.54 mg/L de NaOCl en las sub-muestras 1 y 2, no dieron lugar a la precipitación deseada aunque sí se observó turbidez indicando la existencia de reacción. Concentraciones de 0.80 a 1.36 mg/L iniciaron precipitación aunque con permanencia de turbidez por sólidos suspendidos, no sedimentables. A partir de 1.62 mg/L se observó precipitación adecuada y ausencia de turbidez en las muestras indicando que la reacción de oxidación alcanza sus niveles óptimos. El tiempo de

precipitación estuvo en función del aumento en las concentraciones de oxidante alcanzándose tiempos óptimos (30 minutos) a partir de 2.72 mg/L de NaOCl (Tabla 2).

La concentración de hierro en el sobrenadante de las sub-muestras varió de manera inversamente proporcional al incremento en la dosis de NaOCl (Tabla 2). Se observó alta correlación entre ambas variables ($r = -0.982$, $P < 0.0001$).

El coeficiente de regresión obtenido en el análisis bivariado fue $r^2 = 0.965$, el cual puede interpretarse como la proporción de la varianza de la concentración de hierro en el sobrenadante que puede atribuirse a la varianza de la concentración de NaOCl en la muestra. Por cada unidad de aumento en la concentración de NaOCl (mg/L) disminuye la concentración de hierro en el sobrenadante de la muestra en 0.717 mg/L ($\beta_1 = -0.717$, I.C.95%: -0.807 a -0.626) (Tabla 2). La variación mínima en el porcentaje de remoción de hierro entre muestras con concentraciones ascendentes de NaOCl fue de 2.8% y la máxima, de 20.9% (Gráfica 2).

DISCUSIÓN

El 75.9% del hierro precipita durante la trayectoria del agua desde la salida de pozo profundo hasta el punto más lejano de la red de distribución y se deposita en las paredes de la tubería de conducción del agua de abastecimiento. Se observaron

TABLA 2. Concentraciones de hierro en el sobrenadante (mg/L), error estándar (ee) y características físicas de las muestras después de un tratamiento con NaOCl (0 a 3.52 mg/L), 5 minutos de agitación y 60 minutos de reposo en sub-muestras de 500 mL de agua del pozo profundo de abastecimiento, Municipio de Nazareno, Etlá, Oax., México.

Muestra	NaOCl (mg/L)	Tiempo de precipitación (minutos)	Aspecto de la muestra	Hierro en sobrenadante mg/L (ee)	pH
0	0	0	Clara sin precipitado	2.2 (0.03)	7.0
1	0.26	No se observó precipitación	Turbia sin precipitado	2.20 (0.04)	7.0
2	0.54	No se observó precipitación	Turbia sin precipitado	2.10 (0.03)	7.0
3	0.80	45	Turbia con precipitado	1.93 (0.04)	7.1
4	1.36	55	Turbia con precipitado	1.87 (0.03)	7.1
5	1.62	45	Clara con precipitado	1.41 (0.02)	7.3
6	1.90	35	Clara con precipitado	1.03 (0.03)	7.4
7	2.16	35	Clara con precipitado	0.77 (0.02)	7.7
8	2.44	35	Clara con precipitado	0.62 (0.02)	7.7
9	2.72	30	Clara con precipitado	0.41 (0.01)	8.0
10	2.98	30	Clara con precipitado	0.21 (0.01)	8.1
11	3.26	30	Clara con precipitado	<0.03 (<0.01)	8.1
12	3.52	30	Clara con precipitado	<0.03 (<0.01)	8.3

concentraciones de 2.2 mg/L de hierro en el pozo de abastecimiento y de 0.53 mg/L de hierro a los 2,000 m de distancia del mismo, en el inicio de la red de abastecimiento del barrio de Arriba del Municipio de Nazareno, Etlá, Oax., provocando problemas de incrustación que se agudizan en zonas de baja velocidad de conducción y que originan altos costos de mantenimiento. No obstante estas pérdidas significativas de hierro, la concentración de éste en el punto final de la línea de conducción es aún elevada si consideramos el límite máximo que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994), que es de 0.3 mg/L.

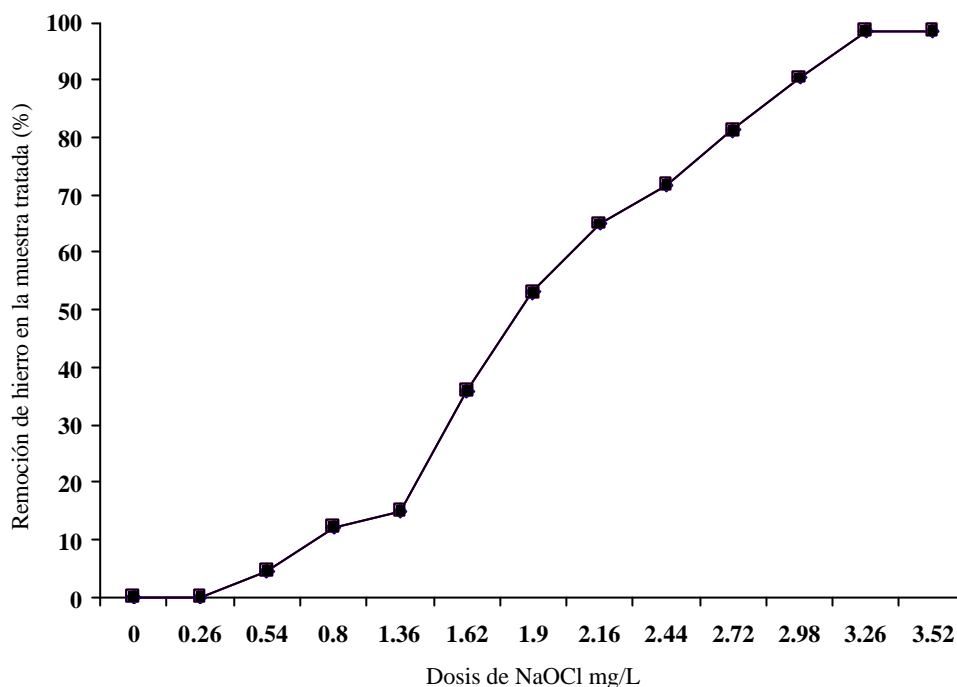
Las actividades derivadas de la producción de derivados lácteos en la zona, pueden tener influencia sobre las concentraciones de hierro en el agua de abastecimiento del municipio de Nazareno, Etlá, Oax. La actividad importante de ganado vacuno, requerida en este tipo de industrias genera cantidades importantes de materia orgánica que, al no tener una adecuada disposición, inciden en el suelo y en el subsuelo. Por otro lado, durante muchos años en la zona de estudio, la misma industria de lácteos ha producido aguas residuales con altos contenidos de materia orgánica, que al ser vertidas sin tratamiento a cuerpos receptores como son los ríos adyacentes, han dado lugar a procesos biológicos en los que la acción bacteriana utiliza el Fe₂O₃ disponible y libera hierro reducido (Fe⁺⁺), soluble en agua.

En aguas naturales, como las del Municipio de Nazareno, Etlá, Oax., que presentan niveles

importantes de alcalinidad (pH de 6.5-9.0), con alto contenido de carbonatos ferrosos, solubles, la remoción de hierro depende de la oxidación de estas formas de (Fe⁺⁺) para obtener Fe⁺⁺⁺ como hidróxido férrico Fe (OH)₃, que es soluble sólo a concentraciones muy bajas de hierro (5.58 x 10⁻⁴ a 5.58 x 10⁻⁵ mg/L) en un rango de pH de 7-10 (STUMM y MORGAN, 1981).

La turbidez, que se considera un indicador de contaminación (ESPIGARES y FERNÁNDEZ, 1999), se dejó de observar a partir de concentraciones de 1.62 mg/L y superiores, no obstante, la concentración de hipoclorito de sodio con la que se obtuvo agua de abastecimiento dentro de la Norma Oficial Mexicana, Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano (NOM-127-SSA1-1994) con respecto al hierro, fue 3.26 mg/L; aplicando las condiciones de tratamiento descritas en este trabajo. La concentración final de hierro en el sobrenadante fue <0.03 mg/L, con un tiempo de precipitación de 30 minutos y un aspecto libre de turbidez. En estas condiciones, el pH de 8.1 se encuentra dentro de la misma norma.

La aplicación de esta alternativa de tratamiento para la remoción de hierro en el agua de abastecimiento municipal se recomienda para municipios con limitaciones de recursos financieros y personal técnico como es el caso del Municipio de Nazareno, Etlá, Oax. El uso de un compuesto oxidante como lo es el hipoclorito de sodio (NaOCl) se facilita en comunidades donde no existen plantas



GRÁFICA 2. Porcentaje de remoción de hierro en sub-muestras de 500 mL del agua del pozo profundo de abastecimiento del Municipio de Nazareno, Etlá, en México, después de un tratamiento con NaOCl, agitación durante 5 minutos y, posteriormente, 60 minutos de reposo.

potabilizadoras, por lo que el agua de abastece directamente de la fuente a las tomas domiciliarias. El organismo operador municipal del agua, tiene conocimientos básicos y experiencia para el manejo seguro y eficiente del hipoclorito de sodio, debido a que ha sido manejado por varios años para la desinfección del agua de consumo municipal, directamente en la fuente de abastecimiento. El tratamiento es de bajo costo por el valor accesible del NaOCl en el mercado y por su poder de oxidación en bajas concentraciones, además de que puede ser proporcionado o subsidiado por las autoridades federales y estatales correspondientes.

Las características del equipo de jarras utilizado se pueden escalar en el diseño de una planta de remoción de hierro a nivel municipal. Al aplicar esta alternativa de tratamiento será necesario disponer el lodo producido durante la oxidación, que por sus características puede deshidratarse mediante simple exposición al sol y transportarse a terrenos fuera de la zona de estudio, donde las propiedades de pH y hierro del mismo, sean de utilidad.

Se recomienda realizar pruebas exhaustivas de tratabilidad en el momento del diseño de una planta de remoción de hierro por oxidación con hipoclorito de sodio. Según el caso, pueden ser probadas otras sales de cloro así como distintas concentraciones

valorando resultados de acuerdo con el pH final del agua y la cantidad de los lodos generados.

BIBLIOGRAFÍA

American Water Works Association (AWWA). Water Quality and Treatment. McGraw-Hill Inc., New York, 1990.

American Water Works Association (AWWA). Handbook of Community Water Supplies. McGraw-Hill Inc., 4a Ed., New York, 1991.

Arezzini B, Lunghi B, Lungarella G. Iron overload enhances the development of experimental liver cirrosis in mice. *Int Biochem Cell Biol*, 2003; 35:486-95.

APHA, AWWA, WPCF. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Ediciones Díaz de Santos, 17 Ed. España 1992.

Beard JL. Iron biology in immune function, muscle metabolism and neuronal functioning. *J Nutr*, 2001; 131:568S-79S.

Belmonte JS. Caracterización del subsuelo de los Valles Centrales de Oaxaca. Informe Técnico N° 51. CIIDIR-Oaxaca. México 2000.

Chiueh CC. Iron overload, oxidative stress and axonal dystrophy in brain disorders. *Pediatr Neurol*, 2001; 25:138-47.

Emerit J, Beaumont C, Trivin F. Iron metabolism, free radicals and oxidative injury. *Biomed Pharmacother*, 2001; 55:333-39.

Espigares García M, Fernández-Crehuet M. Calidad del agua para consumo público: caracteres físico-químicos. En: Estudio sanitario del agua. Pérez-López JA y Espigares García M. (eds). Editorial Universidad de Granada pp. 85-114. Granada, 1999.

Groff JL, Gropper SS, Hunt SM. *Advanced Nutrition and Human Metabolism*. West Publishing Company, New York, 1995.

Hallberg L. Perspectives on nutritional iron deficiency. *Annu Rev Nutr*, 2001; 21:1-21.

INEGI. Anuario estadístico del Estado de Oaxaca, INEGI 2002. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México 2003.

INEGI. Censos económicos del Estado de Oaxaca, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México 1999.

Kiely, G., *Ingeniería ambiental*, 1ª Ed., McGraw-Hill, Interamericana de España 1997.

Leung AK, Chan KW. Iron deficiency anemia. *Adv Pediatr*, 2001; 48:385-408.

Lieu PT, Heiskala M, Peterson PA, Yang Y. The roles of iron in health and disease. *Mol Aspects Med*, 2001; 22:1-87.

Marcó L, Azario R, Metzler C, García MC. La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. *Hig Sanid Ambient* 2004; 4:72-82.

Municipio de Nazareno, Etl. Informe de Actividades Municipales de Nazareno, Etl, Oax, 2001, México 2002.

NOM-127-SSA1-1994, Norma Oficial Mexicana: Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano, Gestión Ambiental Mexicana, 8ª versión, Cultura Ecológica A.C., México 2001.

Powell ST. Acondicionamiento de agua para la industria, Editorial Limusa 4ª Ed., México 1981.

Rouault TA. Systemic iron metabolism: a review and implications for brain iron metabolism. *Pediatric Neurol*, 2001; 25:130-37.

Roy CN, Andrews NC. Recent advances in disorders of iron metabolism: mutations, mechanisms and modifiers. *Hum Mol Genet*, 2001; 10:2181-86.

Stumm W, Morgan J. J. *Aquatic Chemistry*, Wiley-Interscience, New York, 1981.