

---

# INCIDENCIA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD EN LA EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA REMOVER ARSÉNICO EN UN REACTOR A FLUJO PISTÓN

ALEJANDRA MARTÍN-DOMÍNGUEZ, MARÍA DE LOURDES RIVERA HUERTA, MARTÍN PIÑA SOBERANIS Y SARA PÉREZ CASTREJÓN

---

## RESUMEN

Se realizaron estudios a escala de laboratorio usando un reactor electroquímico a flujo pistón con electrodos de hierro, que produce hidróxidos de hierro en línea como coagulante. Los objetivos fueron analizar la influencia de la turbulencia en el fenómeno de coagulación por neutralización de carga, así como definir los parámetros que más influyen en la eficiencia electroquímica de producción de hierro y en la remoción de los flocs formados. Los resultados mostraron que las eficiencias de producción de hierro y de remoción de los flocs producidos aumentaron al incrementarse el gradiente de velocidad en el mezclado (G) y el producto de éste por el tiempo de residencia en el reactor (Gt).

La producción de hierro disminuyó conforme transcurrió el tiempo de operación del reactor; sin embargo, un valor de conductividad de  $600\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  originado por la adición de NaCl evitó este decremento y aumentó la eficiencia electroquímica. La presencia de cloro en el agua elevó significativamente la eficiencia en la remoción de hierro pero no influyó en la producción del mismo. En el estudio se partió del supuesto que entre más hierro se removiera después de la sedimentación, mayor sería la cantidad de arsénico que se eliminaría del agua. Los resultados mostraron que hay una buena correlación entre la eliminación de los dos contaminantes.

La coagulación-floculación es uno de los procesos fisicoquímicos más utilizados en el tratamiento de aguas, y básicamente consiste en la aglutinación de las partículas contaminantes en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, denominadas flocs.

La coagulación tiene inicio en el instante en que se agrega el coagulante al agua y dura fracciones de segundo. La etapa siguiente se denomina floculación y durante ésta las

partículas ya desestabilizadas chocan entre ellas para aumentar su tamaño y favorecer su posterior eliminación por sedimentación y/o filtración.

Una vez desestabilizados los coloides en presencia del coagulante, se aglutinan para formar microflocs, lo que puede tardar menos de 60s, luego se aglutinan en partículas mayores y por último se hidratan, aumentando su volumen. La rapidez de estos fenómenos depende del tamaño de las partículas en relación con la agitación del líquido, de su concentración y

de su grado de desestabilización; por lo tanto, uno de los aspectos importantes para que se lleve a cabo la coagulación es la dispersión de los coagulantes en el agua. Por ejemplo, la coagulación por adsorción-neutralización requiere de tiempos inferiores a 1s y la coagulación por barrido requiere entre 1 y 7s (AWWARF, 1991).

Para poder llevar a cabo una dispersión efectiva de los coagulantes en el volumen de agua a tratar se requiere de una intensa turbulencia en el punto de aplicación de los mismos.

---

## PALABRAS CLAVE / Arsénico / Electrocoagulación / Potabilización / Reactor Flujo Pistón /

Recibido: 20/07/2007. Modificado: 09/06/2008. Aceptado: 10/06/2008.

**Alejandra Martín-Domínguez.** Ingeniera Industrial Química, Instituto Tecnológico de Durango, México. Maestra en Ciencias en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, México. DEA y Doctora en Ingeniería de Tratamiento y Descontaminación del Agua, Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas, Toulouse, Francia. Subcoordinadora de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), México. Dirección: IMTA, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col Progreso, Jiutepec, Morelos. C.P. 62550, México. e-mail: alejandra\_martin@tlaloc.imta.mx

**María de Lourdes Rivera Huerta.** Ingeniera Química y Maestra en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Especialista, IMTA, México. e-mail: lrivera@tlaloc.imta.mx

**Martín Piña Soberanis.** Ingeniero Químico y Maestro en Ingeniería Ambiental, UNAM, México. Especialista, IMTA, México. e-mail: mpina@tlaloc.imta.mx

**Sara Pérez Castrejón.** Ingeniera Química, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. Maestra en Ciencias en Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Celaya, México. Consultora Independiente. e-mail: pcsara@yahoo.com

---

La cantidad de energía disipada y el tiempo de retención requerido para dispersar los químicos no están aún bien definidos. El parámetro más utilizado para expresar la energía aplicada es el gradiente de velocidad  $G$  establecido por (AWWARF, 1991) como

$$G = \left( \frac{P_w}{\mu V} \right)^{1/2} \text{ S}^{-1}$$

donde  $P_w$ : energía disipada en el agua (watts),  $V$ : volumen de líquido donde la energía es disipada ( $\text{m}^3$ ), y  $\mu$ : viscosidad dinámica absoluta del líquido ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Para mezcla por coagulación por barrido, la experiencia indica que se pueden seleccionar gradientes ( $G$ ) de 400-800 $\text{s}^{-1}$ . Con coagulación por adsorción-neutralización los gradientes aconsejables están entre 700 y 1000 $\text{s}^{-1}$  para retromezcladores y entre 3000 y 5000 para mezcladores en línea (AWWA, 1990). Sin embargo, los valores óptimos de  $G$  y  $t$  dependen de la composición del agua y de la naturaleza y cantidad de coloides presentes en la misma.

La mezcla rápida se puede realizar utilizando mezcladores de flujo pistón o mezcladores en donde la turbulencia puede inducirse hidráulica o mecánicamente; es decir, utilizando la energía cinética del agua o introduciendo energía procedente de una fuente externa.

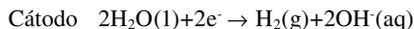
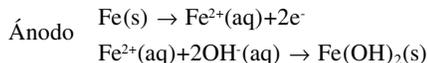
En el caso de la electrocoagulación, a diferencia de la clarificación química, la coagulante es generado *in situ* por la oxidación electrolítica del ánodo.

La ley de Faraday establece que el número de moles producidos ( $m$ ) en un electrodo durante un proceso electroquímico es directamente proporcional a la cantidad de carga que pasa por el circuito. Puesto que la carga  $q$  (en coulombios) está dada por el producto de la corriente (en amperios) y el tiempo (en segundos), se tiene que el número de moles que reaccionan es

$$m = \frac{q}{nF} = \frac{1}{nF} \int I(t) dt$$

En la electrocoagulación se combinan los efectos de la producción, por electrólisis, de gases como  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ , y la producción de cationes tales como el  $\text{Fe}^{2+}$  y el  $\text{Al}^{3+}$  por la oxidación de ánodos de sacrificio. Los iones metálicos pueden reaccionar con el  $\text{OH}^-$  producido en el cátodo durante la formación del  $\text{H}_2$ , formando hidróxidos insolubles que adsorben los contaminantes y contribuyen a la coagulación.

Uno de los mecanismos de formación de hidróxidos metálicos propuesto (Mollah *et al.*, 2001) cuando se utilizan ánodos de hierro es



Esta generación de iones está acompañada por la concentración electroforética de partículas alrededor del electrodo, las cuales neutralizan su carga coagulando. La corriente aplicada induce a los iones  $\text{OH}^-$  a migrar hacia el ánodo, por lo que el pH cerca de éste es más alto que en el resto de la solución, lo que favorece la formación de hidróxido férrico. El  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  forma un coloide color café rojizo y, dependiendo del pH y de la disponibilidad de iones ferrosos, puede reaccionar con el  $\text{O}_2$  disuelto para dar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Los adsorbentes producidos forman largas cadenas de polihidróxidos, los cuales son diferentes a los formados por el hierro cuando se añade en forma de sales, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales del proceso de electrocoagulación. Los flocs formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente.

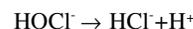
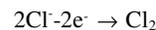
El hidróxido formado remueve los contaminantes presentes en el agua por formación de complejos o atracción electrostática. Los mecanismos de remoción en electrocoagulación incluyen oxidación, reducción, coagulación, absorción, adsorción, precipitación y flotación (Parga *et al.*, 2005). La utilización de electrodos de aluminio tiende a ser minimizada con respecto a los de hierro, debido a los problemas de disposición de los lodos conteniendo ese metal y a la alta pasivación de los electrodos.

El uso de electrodos inertes, como el titanio, y el paso de una corriente alterna también remueve iones metálicos y promueve la coagulación de sólidos suspendidos. En este caso, el movimiento electroforético concentra las partículas de carga negativa en el ánodo y por neutralización de cargas se facilita la coagulación.

En realidad, las condiciones de operación de la electrocoagulación dependen de la química del medio acuoso, especialmente de la conductividad y el pH, pero también influyen el tamaño de partículas, el tipo de electrodos, el tiempo de residencia en el reactor, el espaciamiento entre electrodos y la concentración de los contaminantes. Por otro

lado, un valor muy elevado de densidad de corriente puede disminuir significativamente la eficiencia de la corriente debido a la producción de  $\text{O}_2$  y, además, influye en la pasivación de los electrodos, por lo que algunos recomiendan valores de 20-25  $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$  (Chen, 2004).

La adición de  $\text{NaCl}$  reduce el efecto adverso de la presencia de otros iones como  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , que en presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  forman una película aislante en la superficie de los electrodos, que hace pasivos a los mismos (Chen, 2004). La presencia de sal también ayuda a disminuir el consumo de energía al aumentar la conductividad y, además, cuando hay cloruros en el agua se pueden presentar las reacciones siguientes en presencia de una corriente eléctrica, lo que favorece la desinfección:



Los mecanismos de la electrocoagulación no han sido aún claramente entendidos y hay pocas consideraciones de los factores que influyen en la efectiva remoción de especies iónicas, especialmente iones metálicos de agua. Tampoco se observa la utilización de los criterios bien conocidos de la coagulación química, los cuales deben de cumplirse en la electrocoagulación para el diseño de los reactores electroquímicos.

El objetivo del presente trabajo es contribuir al estudio de la electrocoagulación y su aplicación en la remoción de arsénico por medios electroquímicos, mediante el uso de un reactor a flujo pistón que permite generar como coagulante hidróxidos de hierro en línea. Los esfuerzos se encaminaron principalmente a estudiar la influencia de la turbulencia en el fenómeno de coagulación por adsorción, a determinar las condiciones hidráulicas que permitan el control del gradiente de mezcla óptimo para la etapa de coagulación, y a establecer los parámetros que más influyen en la eficiencia electroquímica de producción de hierro y en la remoción de los flocs formados.

## Metodología

Para la selección del tipo de reactor más conveniente se analizaron las ventajas y desventajas de las diferentes opciones que podían aplicarse, tanto para la forma de producir el coagulante, como el funcionamiento hidráulico del reactor.

La producción del coagulante es el objetivo principal de la electrocoagulación, ya que éste será el promotor de la eliminación de los contaminantes a

tratar. Para la producción del coagulante *in situ*, es indispensable tener una mezcla eficiente que optimice la interacción de los iones de hierro o aluminio con los contaminantes presentes en el agua antes de que se formen los hidróxidos. Esto es factible hacerse controlando la hidráulica del sistema.

La etapa de coagulación es una de las más críticas para lograr la remoción óptima de los contaminantes y de su buen funcionamiento dependerá que la etapa de floculación y sedimentación trabajen adecuadamente. En la coagulación se requiere que la dosis de reactivo sea la requerida de acuerdo a las características del agua a tratar, pero también que la energía aplicada en la mezcla optimice el proceso.

La agitación puede ser llevada a cabo por medios mecánicos o hidráulicos. Ambos tienen ventajas y desventajas. La agitación mecánica se adecua más a reactores tipo mezcla perfecta y la hidráulica al flujo pistón. En el presente estudio se escogió el flujo pistón, por ser la configuración hidráulica que presenta menos problemas de zonas muertas y cortocircuitos, por la mayor facilidad de adaptar los electrodos en la estructura misma del reactor y, sobre todo, para tener un control más preciso del tiempo de residencia de toda el agua a tratar durante el mezclado. Cabe mencionar que en un reactor de mezcla completa, los tiempos de residencia no son los mismos para todos los componentes del fluido, y que la eficiencia de la coagulación depende en gran medida de que se logren tiempos de residencia <1s. Esto es más fácil de controlar en un reactor a flujo pistón.

Para el diseño del mezclador hidráulico se buscó tener gradientes de velocidad altos, generando mayores pérdidas de carga hidráulica aplicando suficiente energía cinética en el flujo de entrada.

Para aproximar el tiempo de retención real al tiempo nominal escogido durante el diseño del mezclador hidráulico, se dividió el reactor con pantallas deflectoras que al mismo tiempo fungían como electrodos. Cuanto mayor sea el número de compartimientos, más cerca se estará del comportamiento en flujo pistón (Figura 1).

Bajo esas condiciones hidráulicas, cada canal funciona como una celda independiente y el flujo, a medida que va pasando por el reactor, va recibiendo el coagulante aumentando su concentración en Fe<sup>2+</sup> con el tiempo. Un balance de masa en el reactor permite establecer

$$QC_0 + \frac{dm}{dt} = QC_N$$

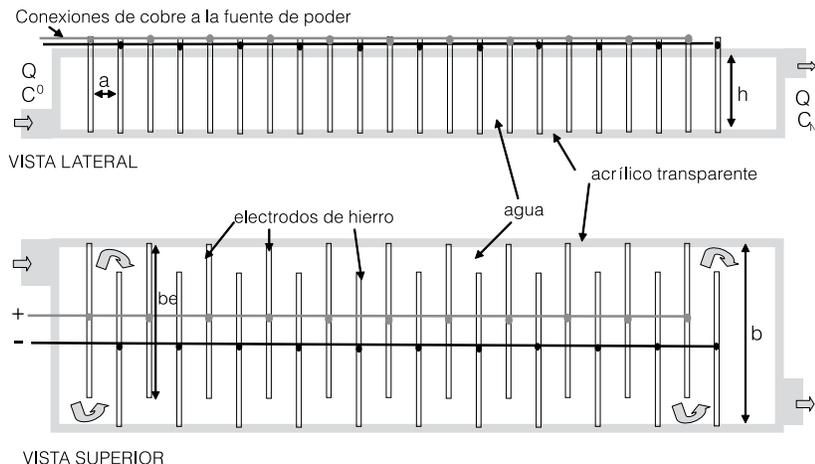


Figura 1. Esquema de la unidad de electrocoagulación a flujo pistón. Q: Flujo de agua a tratar (l·s<sup>-1</sup>), C<sub>0</sub>: concentración inicial de hierro (mg·l<sup>-1</sup>), y C<sub>N</sub>: concentración de hierro a la salida del reactor (mg·l<sup>-1</sup>)

donde Q: flujo de agua a tratar (l·s<sup>-1</sup>), C<sub>0</sub>: concentración inicial de hierro (mg·l<sup>-1</sup>), C<sub>N</sub>: concentración de hierro a la salida del reactor (mg·l<sup>-1</sup>), y dm/dt es la variación del hierro con respecto al tiempo, la cual se puede calcular mediante la Ley de Faraday antes mencionada como

$$m = \frac{q}{nF} = \frac{1}{nF} \int_0^t I dt = \frac{It}{nF}$$

y por lo tanto

$$\frac{dm}{dt} = \frac{It}{nFt} = \frac{I}{nF}$$

Finalmente, despreciando la concentración de hierro a la entrada del reactor, se calcula su concentración a la salida, considerando el número de electrones intercambiados (n= 2 para electrodos de Fe y n= 3 para electrodos de Al), como

$$C_N = C_0 + \frac{I}{QnF}$$

En cuanto al material de los electrodos, en este trabajo se utilizó el hierro, ya que es bien conocida la capacidad de los hidróxidos de hierro para adsorber arsénico. Sin embargo, los resultados están enfocados al comportamiento hidráulico, por lo que son aplicables a los contaminantes cuya remoción por coagulación se ve favorecida por el fenómeno de adsorción-neutralización y no por barrido. La experimentación que se llevó a cabo para el desarrollo de este trabajo consistió en analizar la eficiencia en la producción de los iones de interés (Fe) bajo condiciones controladas de contaminación del agua a tratar, analizando aspectos hidráulicos principalmente y comparando los resultados con una coagulación química convencional llevada a cabo en un equipo de pruebas de jarras.

El reactor se diseñó en material de acrílico transparente con una

TABLA I  
DIMENSIONES DEL REACTOR

Pares de electrodos	12,5
Espacio entre electrodos (a)	0,6 cm
Ancho de electrodos (be)	4,0 cm
Altura de electrodos (h)	2,0
Ancho de celda (b)	4,3 cm
# de canales activos	24

configuración rectangular, permitiendo que en el canal formado por cada par de electrodos exista la longitud mínima para que las líneas de flujo se establezcan plenamente. La celda se construyó con 25 electrodos conectados en paralelo, con dimensiones de 4x2x0,5cm fabricados en hierro de tipo comercial y separados 0,6cm entre ellos (Tabla I).

Con este tipo de reactor se llevaron a cabo las pruebas en el laboratorio, las cuales consistieron en variar el gasto de operación, la conductividad de la solución y la presencia de cloro, para tratar de inferir que parámetros influyen más en la eficiencia electroquímica de producción de hierro, pero también en la remoción fisicoquímica de los flocs formados, al pasar por la floculación y la sedimentación.

El reactor se montó en un sistema equipado para tener un control preciso del gasto, sin variaciones durante la operación. Se utilizó un recipiente de volumen aforado de 734 litros que alimenta a otro de 200 litros. La tubería de todo el sistema es de PVC hidráulico de ½". El tanque de 200 litros tiene adaptado un flotador que permite mantener el nivel de agua, y para llevar el agua al reactor se utiliza una bomba Saer de 0,5HP y 3450rpm. Para medir el gasto de operación se utilizó un rotámetro, pero para mayor

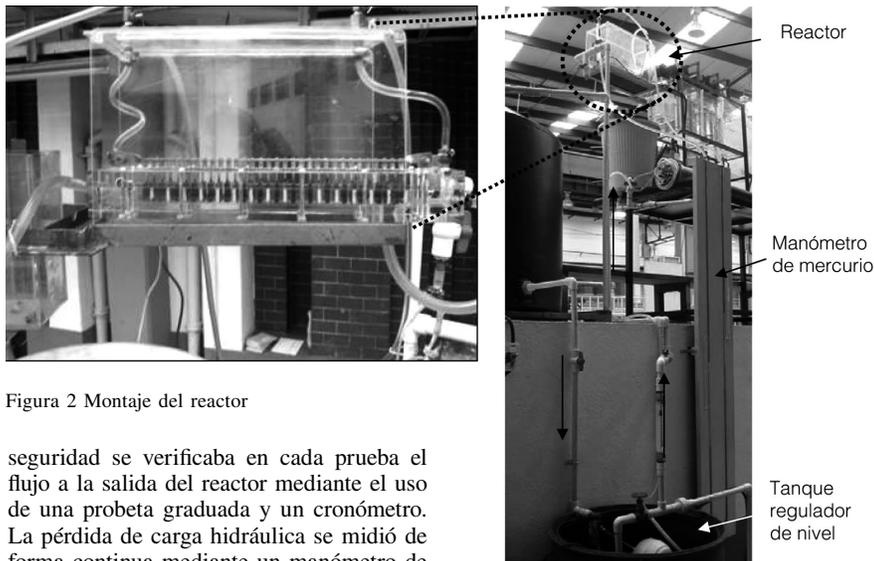


Figura 2 Montaje del reactor

seguridad se verificaba en cada prueba el flujo a la salida del reactor mediante el uso de una probeta graduada y un cronómetro. La pérdida de carga hidráulica se midió de forma continua mediante un manómetro de mercurio en U, conectado a la entrada y salida del reactor (Figura 2). En esta etapa del estudio se trató de encontrar las condiciones óptimas de operación mediante la utilización de la prueba de jarras convencional que permite flocular y sedimentar de manera controlada un volumen de 0,5 litros del agua proveniente del reactor.

En cada prueba se fijaba la conductividad de la solución mediante la adición de NaCl comercial, con la finalidad de disminuir los efectos de la pasivación. Avsar (2007) menciona que la presencia de NaCl reduce los efectos adversos de otros iones, como bicarbonatos y sulfatos, y recomienda la electrocoagulación en presencia de un 20% de iones Cl<sup>-</sup>.

Una vez establecido el flujo y la corriente de estudio, y estabilizada la conductividad del agua a la salida del reactor, se tomaba una muestra para la cuantificación de Fe total (método FerroVer en un espectrofotómetro Hach DR/2010) y otra de 500ml que se colocaba en un aparato de jarras (Phipps & Bird Stirrer modelo 7790-400) en vasos de precipitados para aplicar la floculación en tres etapas de 7min a 85, 60 y 30rpm·s<sup>-1</sup>. Posteriormente, sin agitación, se dejaba sedimentar la muestra durante 30min. Al final de la sedimentación se tomaba líquido del sobrenadante para determinación de pH (con un potenciómetro Orion Modelo 420), conductividad (con un conductímetro Orion Modelo 145), hierro total y cloro libre (método DPD en un espectrofotómetro Hach DR/2010), sólo en aquellos casos en donde se requiriera. La concentración de arsénico se midió mediante espectrometría de absorción atómica - generación de hidruros.

Para fijar la dosis de hierro establecida se hizo pasar una co-

rriente entre los electrodos, la cual fue calculada de acuerdo a la Ley de Faraday, en función del flujo de agua a tratar. El equipo utilizado fue una fuente de poder Sorensen modelo DLM 40-15 con control de 0-40V y 0-15A. La producción de hierro, la pérdida de carga, el voltaje aplicado para mantener la corriente de operación y el gasto de operación, se monitoreaban a los 10min de haber encendido la fuente de poder y después cada 0,5h o según lo ameritara la prueba.

Todas las pruebas se llevaron a cabo con agua de pozo cuyos valores promedio de conductividad y pH fueron 250µS·cm<sup>-1</sup> y 7,7 respectivamente. Se monitoreó la eficiencia electroquímica del reactor durante un tiempo de operación de 3h para diferentes gastos hidráulicos (0,254-5 l·min<sup>-1</sup>). La conductividad de operación también se varió mediante la aplicación de sal común hasta un máximo de 900µS·cm<sup>-1</sup> y se trabajó en presencia y ausencia de cloro (hipoclorito de sodio comercial) para aumentar la eficiencia de remoción del hierro.

La dosis de hierro que se fijó en el estudio (10mg·l<sup>-1</sup>) se escogió considerando probar el sistema para remover arsénico a una concentración de 100µg·l<sup>-1</sup> y tomando como base la dosis óptima que se requeriría si se tratara el agua de manera convencional con cloruro férrico. La dosis se calculó mediante una prueba de jarras y se basó en la hipótesis que si el proceso de electrocoagulación funciona adecuadamente, debe requerirse prácticamente la misma cantidad de hierro que en la coagulación química, o de ser posible menos; de lo contrario algo no estaría funcionando adecuadamente en todo el tren de tratamiento.

La concentración de arsénico probada es la que se encuentra frecuentemente en fuentes de abastecimiento de agua potable con problemas de arsénico en México. Sin embargo, como ya se mencionó, en este estudio el interés se centró en la optimización de la producción del hierro y su posterior floculación y sedimentación, con la finalidad de que cualquier otro contaminante también se pueda remover de forma óptima.

Para asegurar que los electrodos se encontraran libres de depósitos, entre cada prueba se efectuó un lavado químico del reactor utilizando 2 litros de HCl 5% durante 8min. El lavado se realizó con una bomba peristáltica trabajando a 1,98 l·min<sup>-1</sup>, que permitía recircular el ácido y enjuagar posteriormente con agua el reactor sin tener que desmontarlo.

## Resultados

### *Pasivación de los electrodos*

De acuerdo con la literatura, la pasivación de los electrodos se observa como la disminución de la producción de hierro en el tiempo, manteniendo la corriente y el gasto de operación constantes. La eficiencia se calcula con respecto a la cantidad de hierro que en teoría se debería producir según la ley de Faraday para el gasto de operación y la corriente establecida.

La pasivación puede deberse a la formación de una capa de óxido y/o hidróxidos en la superficie del electrodo, cuyas características poco conductivas aumentan la resistencia al paso de la corriente. Cuando esto sucede, para mantener constante la corriente pre-establecida, la diferencia de potencial eléctrico aplicada a los electrodos aumenta para vencer esta resistencia.

En este estudio se hicieron pruebas de 3h de operación, a conductividades y flujos diferentes, utilizando el reactor en presencia y ausencia de cloro (Figuras 3 y 4). En la Figura 3a se observa que, a conductividades bajas, la eficiencia en la producción de hierro (FeP) disminuye paulatinamente conforme la prueba transcurre. Sin embargo, esta disminución no se puede relacionar con la formación de una capa en los electrodos que aumente la resistencia, porque el voltaje en lugar de aumentar disminuyó o se mantuvo estable con el tiempo, como se puede observar en el caso del gasto menor de operación (Figura 3b).

Por el contrario, la pérdida de carga a través del reactor aumenta visiblemente en los gastos por arriba de los 2 l·min<sup>-1</sup>, indicando que

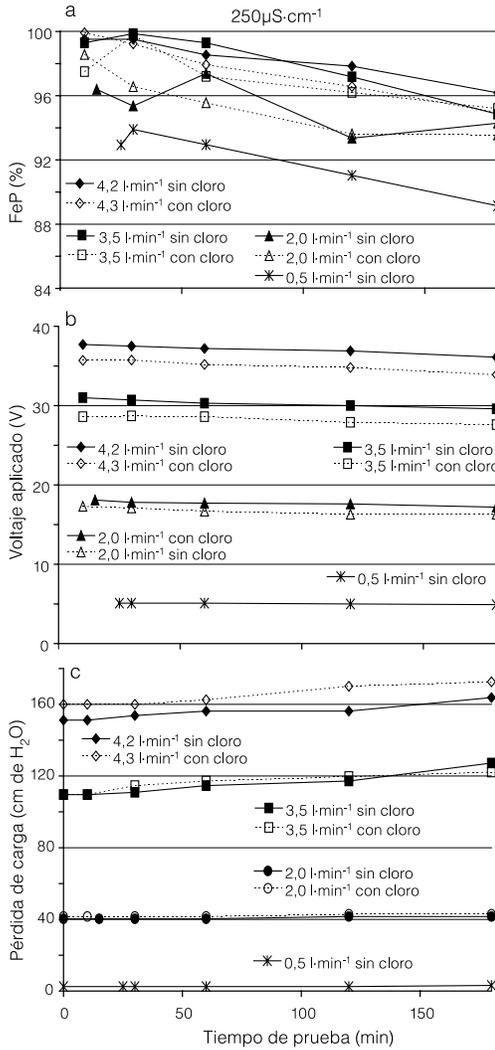


Figura 3. Producción de hierro (a), voltaje aplicado (b) y pérdida de carga (c) a  $250\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  con y sin cloro.

los hidróxidos formados se están acumulando en el interior del reactor, teniendo un efecto de taponamiento en su interior (Figura 3c). En esta etapa

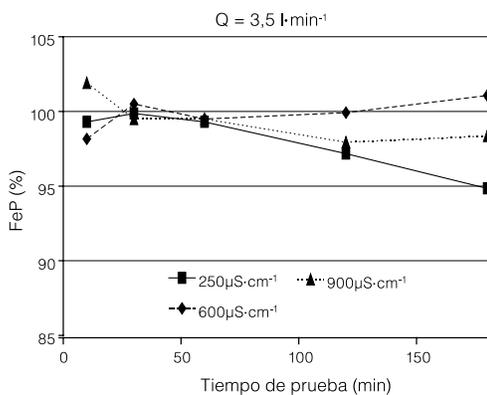


Figura 4. Producción de hierro a diferentes conductividades.

del estudio no se encontró evidencia suficiente de que la pasivación de los electrodos se deba al aumento de la pérdida de carga, ya que a conductividades altas no hubo pasivación, aún cuando la carga hidráulica se incrementó, y tampoco se puede relacionar con la formación de una capa resistiva en los electrodos, porque el voltaje disminuyó en lugar de aumentar, aún cuando la corriente permaneció constante.

Lo que sí se observa de manera global, es que las eficiencias son inferiores a flujos bajos y la presencia de cloro no influye significativamente en la producción del hierro (FeP). Con respecto a la conductividad (Figura 4), a  $600\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  se observa una menor pasivación de los electrodos; de hecho, la eficiencia electroquímica aumenta por arriba del 100%, fenómeno que también reportan otros autores (Mameri *et al.*, 2001, Chen, 2004, Zhu *et al.*, 2007). Olgúin *et al.* (1988) la atribuyen a la corrosión del material, especialmente cuando hay cloro presente en el agua; es decir, que además de la disolución del ánodo provocada por la corriente misma, puede presentarse una disolución química por interacción de éste con la solución.

*Efecto del gradiente de velocidades en el mezclado y la presencia de cloro en la eficiencia de producción y de remoción de Fe.*

Las pruebas realizadas a diferentes conductividades y flujos, al ser graficadas juntas, muestran una tendencia a que la eficiencia del hierro producido (FeP) y del removido (FeR) aumente al aumentar el gradiente de velocidades en el mezclado (G) y el producto Gt (Figuras 5 y 6). Sin embargo, debido a la configuración del reactor, no es posible separar los efectos del gradiente y del tiempo de retención, ya que al aumentar el flujo se aumenta también el gradiente, pero

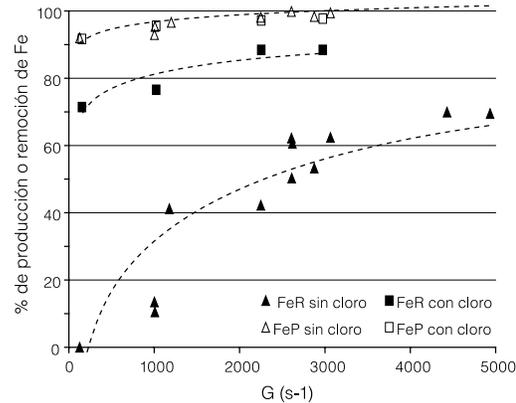


Figura 5. Producción y remoción de hierro con respecto al gradiente aplicado.

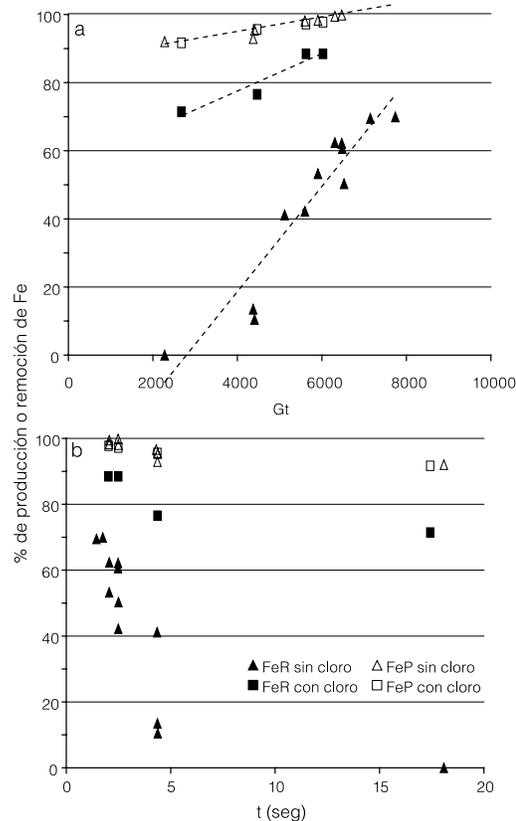


Figura 6. Eficiencia en la producción y remoción de hierro con respecto al Gt aplicado (a) y con respecto al tiempo de contacto en el reactor (b).

se disminuye el tiempo de retención. Este efecto amerita ser profundizado en otro estudio, comparando reactores de diferente tamaño que trabajen con el mismo gradiente, pero con diferentes tiempos de retención.

En estas mismas gráficas se observa que la presencia de cloro en el agua a tratar eleva significativamente la eficiencia en la remoción de hierro, pero no influye en la producción del mismo, lo que implica que actúa di-

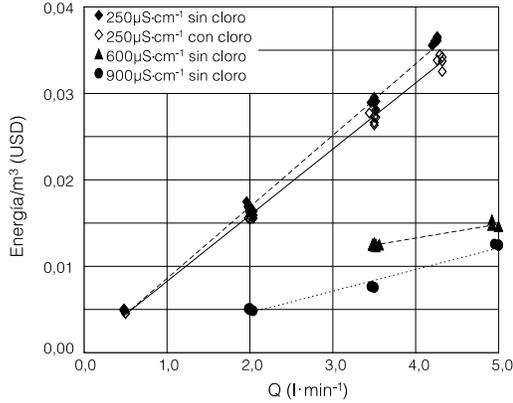


Figura 7. Costo por energía en función del gasto tratado para un mismo reactor.

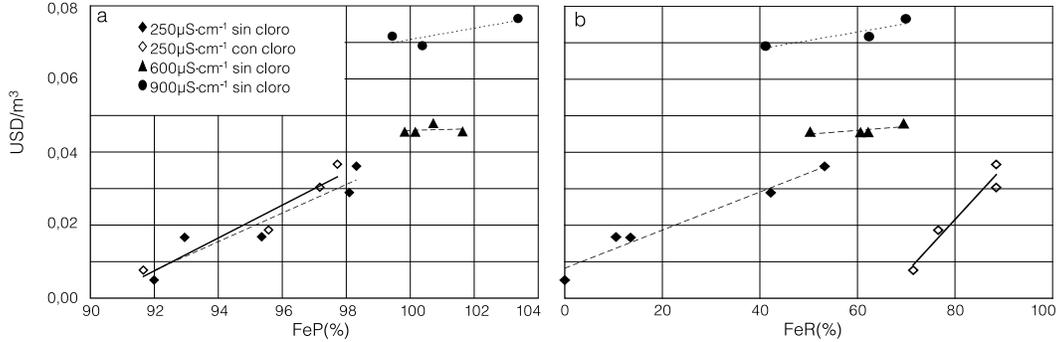


Figura 8. Costos de operación con respecto a la producción (a) y remoción (b) de hierro.

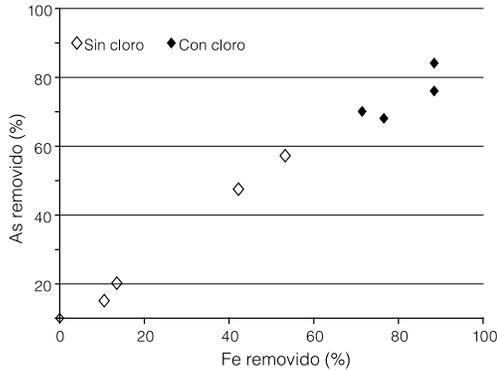


Figura 9. Remoción de arsénico con respecto a la remoción de Fe.

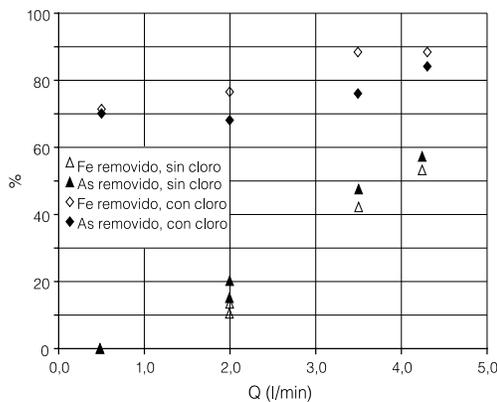


Figura 10. Remoción de Fe y As en función del caudal, con y sin la adición de Cl.

rectamente sobre las características del floc y no en el aspecto electroquímico del reactor.

### Costos de operación

Para las diferentes pruebas realizadas se calcularon los kWh consumidos por la aplicación de la diferencia de potencial requerida entre los electrodos para fijar la corriente de estudio, y por la potencia requerida para hacer circular el agua a través del reactor. Los costos se obtuvieron considerando el precio a USD 0,098 por Kw-h. También

tienen eficiencias elevadas en la producción de hierro (Figura 8a). Las mejores eficiencias en la remoción de hierro se obtienen al agregar cloro y los costos no se elevan tanto al compararlos con los resultados obtenidos con agua natural (Figura 8b).

### Relación Fe removido - As removido

En todo el estudio se parte del supuesto que entre más hierro se remueva después de la floculación y la sedimentación, es decir, entre más eficiente sea la formación de los flocs al precipitar el hierro formado en el reactor, mayor será la cantidad de arsénico que se elimina del agua a tratar. Los resultados de las pruebas de EC después de la etapa de floculación y sedimentación muestran que hay una buena correlación entre la eliminación de los dos contaminantes (Figura 9).

En la Figura 10 se observa el beneficio de la adición de cloro en el agua que entra al reactor. La presencia de este oxidante aumenta considerablemente la eficiencia de remoción de hierro y arsénico del agua en cualquiera de los caudales de estudio. Este beneficio es más notable cuando los caudales que pasan a través del reactor son más bajos. Este resultado está asociado a que a caudales menores, o sea a gradientes de velocidad en el reactor de EC bajos, las eficiencias de remoción son bajas, por lo que la adición de cloro mejora la sedimentabilidad del floc haciendo más eficiente su remoción. La operación del reactor a caudales altos, y por lo tanto a G altos, de por sí produce altas eficiencias de remoción.

### Conclusiones

La electrocoagulación es un sistema de tratamiento eficiente y con perspectivas interesantes para la eliminación de diferentes tipos de contaminantes en el agua. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que es susceptible a diferentes parámetros de operación que pueden modificar su eficiencia y variar los costos de operación. Uno de estos parámetros es el cloro, el cual no influye de manera significativa en la eficiencia de la producción del hierro, pero si mejora de manera importante la de remoción del mismo en las etapas de floculación y

se consideró el costo de añadir sal para aumentar la conductividad en el caso de 600 y 900  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  a un costo de USD 0,194 por kg de sal común, y el de añadir cloro a un costo de USD 0,675 por kg de  $\text{Cl}_2$ , utilizando gas cloro.

Los resultados muestran (Figura 7) que el aumentar el gasto y por lo tanto Gt para un reactor dado, aumenta el costo por  $\text{m}^3$  de agua tratada. Esto puede explicarse de la siguiente manera: al elevar el gasto para una misma configuración del reactor, las pérdidas de carga se elevan en forma cuadrática con la velocidad del líquido, y como al aumentar el gasto tiene que elevarse la corriente para mantener la misma dosis de hierro, esto origina que el voltaje también aumente y que por lo tanto la potencia consumida se eleve también al cuadrado. Los resultados serán distintos si al escalar el gasto, se escala también la configuración del reactor para mantener la misma relación de velocidad y de densidad de corriente.

La alternativa más cara es aumentar la conductividad eléctrica del agua, aunque se ob-

sedimentación. La conductividad del agua es otro factor que afecta directamente la eficiencia electroquímica, pero al aumentarla añadiendo una sal se elevan considerablemente los costos de operación del sistema. El  $Gt$  de la mezcla tiene un claro efecto sobre la eficiencia de la formación del floc y, por lo tanto, en la remoción del hierro producido en el reactor; sin embargo, se requiere profundizar en el estudio para separar el efecto del gradiente con respecto al tiempo de residencia. En relación a los costos de operación del sistema, éstos son competitivos comparados con la coagulación convencional.

#### REFERENCIAS

- Avsar Y, Kurt U, Gonullu T (2007) Comparison of classical chemical and electrochemical process for treating rose processing wastewater. *J. Hazard. Mater.* 148: 340-345.
- AWWA (1990) *Water Quality and Treatment*. Pontius, FW (Ed.). 4ª ed. American Water Works Association. Mc Graw-Hill. Nueva York, NY, EEUU. 1194 pp.
- AWWARF (1991) *Mixing In Coagulation and Flocculation*. Amirtharajah A, Clark MM, Trussell MM (Eds.). American Water Works Association Research Foundation. Denver, CO, EEUU. 426 pp.
- Chen G (2004) Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separ. Purif. Technol.* 38: 11-41.
- Mameri N, Lounici H, Belhocine D, Grib H, Piron DL, Yahiat Y (2001) Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminium electrodes *Separ. Purif. Technol.* 24: 113-119.
- Mollah MY, Schennach R, Parga JR, Cocke D (2001) Electrocoagulation (EC)-science and applications. *J. Hazard. Mater.* B84: 29-41
- Olguín S, Montoya F, Flores E (1988) *Fundamentos de Electroquímica*. Instituto Politécnico Nacional. México. 219 pp.
- Parga JR, Cocke D, Valenzuela J, Gomes J, Kesmez M, Irwin G, Moreno H, Weir M (2005) Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México. *J. Hazard. Mater.* B124: 247-254.
- Zhu J, Zhao H, Ni J (2007) Fluoride distribution in electrocoagulation defluoridation process. *Separ. Purif. Technol.* 56: 184-191.

---

### INCIDENCE OF THE VELOCITY GRADIENT IN THE ELECTROCOAGULATION EFFICIENCY FOR ARSENIC REMOVAL IN A PLUG-FLOW REACTOR

Alejandra Martín-Domínguez, María de Lourdes Rivera Huerta, Martín Piña Soberanis and Sara Pérez Castrejón

#### SUMMARY

*Studies at laboratory scale were carried out using a plug-flow electrochemical reactor with steel plates that produces iron hydroxide as coagulant in a continuous form. The goals were first to analyze the influence of turbulence over coagulation due to neutralization charges and second, to define the principal factors that are involved in obtaining high efficiencies of electrochemical iron production and in removing the formed flocs. The results revealed that these efficiencies were increased when the mixture velocity gradient ( $G$ ) and its product by the reactor detention time*

*( $Gt$ ) also rose. The iron production decreased according to the reactor operation time; however, the addition of NaCl to reach a conductivity of  $600\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  avoided the reduction and increased electrochemical efficiency. The presence of chlorine in water raised considerably the iron removal efficiency, but did not affect the iron production. In this study it was assumed that if more iron is removed after sedimentation the amount of eliminated arsenic in water will be higher. The results showed that there is a good correlation between the elimination of both pollutants.*

### INCIDÊNCIA DO GRADIENTE DE VELOCIDADE NA EFICIÊNCIA DA ELECTROCOAGULAÇÃO PARA REMOVER ARSÊNICO EM UM REATOR DE FLUXO PISTÃO

Alejandra Martín-Domínguez, María de Lourdes Rivera Huerta, Martín Piña Soberanis e Sara Pérez Castrejón

#### RESUMO

*Realizaram-se estudos a escala de laboratório usando um reator eletroquímico de fluxo pistão com eletrodos de ferro, que produz hidróxidos de ferro em linha como coagulante. Os objetivos foram analisar a influência da turbulência no fenômeno de coagulação por neutralização de carga, assim como definir os parâmetros que mais influem na eficiência eletroquímica de produção de ferro e na remoção dos flocos formados. Os resultados mostraram que as eficiências de produção de ferro e de remoção dos flocos produzidos aumentaram ao incrementar-se o gradiente de velocidade na mistura ( $G$ ) e o produto deste pelo tempo de residência no reator ( $Gt$ ). A*

*produção de ferro diminuiu conforme transcorreu o tempo de operação do reator; no entanto, um valor de condutividade de  $600\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  originado pela adição de NaCl evitou este decréscimo e aumentou a eficiência eletroquímica. A presença de cloro na água elevou significativamente a eficiência na remoção de ferro, mas não influenciou na produção deste. No estudo se partiu do suposto que entre mais ferro se removera depois da sedimentação, maior seria a quantidade de arsênico que se eliminaria da água. Os resultados mostraram que há uma boa correlação entre a eliminação dos dois contaminantes.*