

CARACTERIZACIÓN DE COLUMNAS REACTIVAS RELLENAS CON ZVI Y DISEÑO DE PROTOTIPOS PARA LA ELIMINACIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA

Eliana Berardozi^{1,2} y Fernando S. García Einschlag¹

¹Instituto de Investigaciones Físicoquímica Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Dpto. de Química, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, Calle 64 Diag. 113, CP (1900), La Plata, Buenos Aires, Argentina.

²Dpto. Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP, Calle 47 N°200, CP (1900), La Plata, Buenos Aires, Argentina.

eliana.berardozi@gmail.com

RESUMEN: Se realizaron estudios de pequeña y mediana escala con columnas reactivas rellenas con hierro cero valente (ZVI) empleadas para la remoción continua de arsénico del agua de consumo. Los ensayos de corta duración en pequeña escala se utilizaron para estudiar el efecto de las variables operativas sobre la producción de Fe, consumo de oxígeno y protones. Los ensayos de en mediana escala permitieron observar la variación temporal de los parámetros hidráulicos de la columna reactiva. Los resultados obtenidos de ambos tipos de experimentos permiten optimizar el tiempo de operación y las condiciones operativas de un prototipo basado en esta técnica.

PALABRAS CLAVE: Columnas reactivas, ZVI (Zero-Valent Iron), Arsénico (As).

En el presente trabajo se estudia una metodología basada en el empleo de hierro cero Valente (ZVI) en sistemas continuos para el tratamiento de aguas de consumo con alto contenido de arsénico. El propósito del estudio es determinar el efecto de las variables operativas sobre la eficiencia de las columnas rellenas y realizar una caracterización hidráulica de las columnas reactivas utilizadas a escala piloto.

La parte experimental del estudio se compone de dos series de ensayos. La primera serie consiste en experimentos de corta duración empleando pequeñas columnas rellenas de lana de acero comercial (Mapavirulana®), diseñados para evaluar el efecto de variables operativas tales como: pH, caudal y carga de hierro en el lecho. A la salida de la columna se realizaron determinaciones de Fe(III), Fe(II), pH y oxígeno disuelto. Con estos valores se estudió, mediante la metodología de superficies de respuesta, el efecto de las variables independientes (tiempo de residencia, masa de relleno y pH de entrada) sobre las variables de respuesta (producción de Fe (II); consumo de protones y oxígeno).

La segunda serie de experimentos incluye ensayos de larga duración y mediana escala, desarrollados en un reactor de operación continua de 6800 ml de capacidad y relleno con el mismo material reactivo. Durante estos experimentos se realizaron determinaciones periódicas de conductividad hidráulica del lecho relleno (K) y distribución de tiempos de residencia (DTR) con el objetivo de evaluar la variación temporal de estos parámetros. La conductividad hidráulica se determino utilizando la Ley de Darcy (ec. 1) y un permeámetro de carga constante por otro lado la evaluación de la distribución de tiempos de residencia se realizó mediante el método estímulo respuesta utilizando IK como trazador.

$$K = \frac{Q \cdot L}{A_r \cdot dH} \quad (\text{ec. 1})$$

K= conductividad hidráulica (cm/min)

Q=caudal (cm³/min)

L=longitud del lecho (cm)

A_r= área de sección transversal (cm²)

dH= carga constante de la columna de agua (cm²)

Observando las superficies de respuesta construidas a partir de los resultados obtenidos en los experimentos de corta duración se encontró que una disminución del pH y un aumento del tiempo de residencia favorecen la producción de Fe(II) (Figura 1). En contraste, en el rango experimental analizado, en la Figura 2 se puede observar que las variaciones en la masa de ZVI empleada no influyen de manera significativa en la producción de Fe(II).

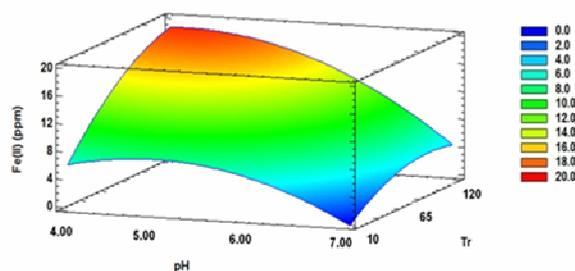


Figura 1. Superficie de respuesta: efecto del pH y tiempos de residencia (seg.), sobre la producción de Fe(II)(ppm).

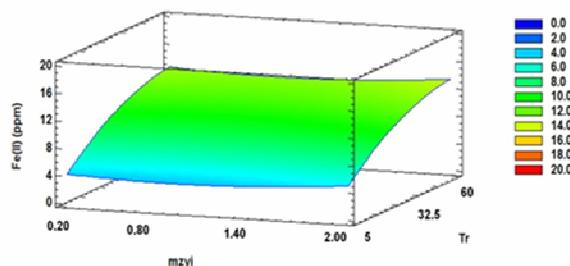


Figura 2. Superficie de respuesta: efecto de la masa de ZVI (gr) y tiempo de residencia (seg.) sobre la producción de Fe(II)(ppm).

El consumo de oxígeno, por otro lado, parece ser independiente del pH inicial, y altamente dependiente tanto del tiempo de residencia como de la masa de ZVI como se muestra en las Figura 3 y Figura 4.

Finalmente, el análisis de las diferencias entre el pH de entrada y el pH de salida muestra que el consumo de protones aumenta con el tiempo de residencia, disminuye con el pH de entrada y presenta un leve descenso al aumentar la masa de ZVI utilizada (Figuras 5-6).

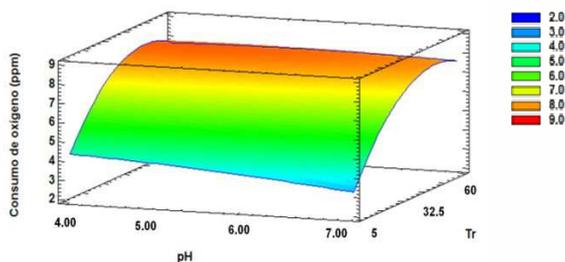


Figura 3. Superficie de respuesta: efecto del pH y tiempo de residencia (seg.) sobre el consumo de oxígeno (ppm).

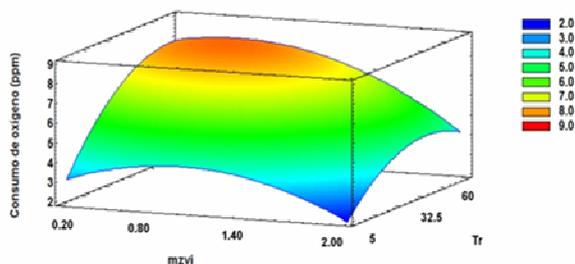


Figura 4. Superficie de respuesta: efecto de la masa de ZVI (gr) y tiempo de residencia (seg.) sobre el consumo de oxígeno (ppm).

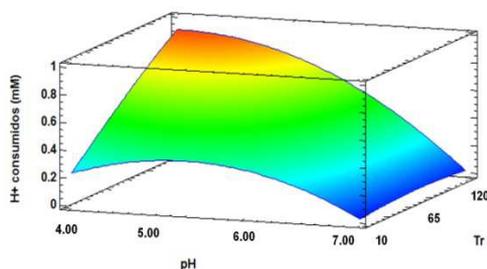


Figura 5. Superficie de respuesta: efecto del pH y tiempo de residencia (seg.) sobre el consumo de protones (mM).

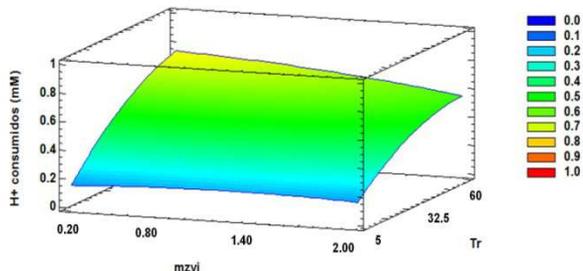


Figura 6. Superficie de respuesta: efecto de la masa de ZVI (gr) y tiempo de residencia (seg.) sobre el consumo de protones (mM).

La determinación periódica de la conductividad hidráulica de la columna nos muestra que a medida que aumenta el tiempo de vida del lecho la conductividad hidráulica disminuye indicando una disminución de la porosidad del relleno lo que provoca un aumento en la pérdida de carga del lecho (Figura 7).

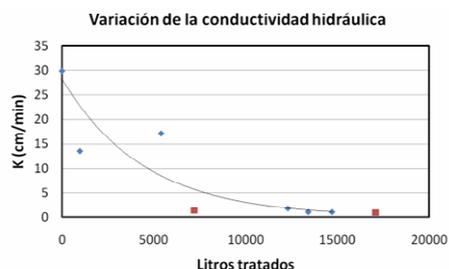


Figura 7. Variación de la conductividad hidráulica con la cantidad de litros tratados por la columna.

Los datos experimentales de las curvas de distribución de tiempos de residencia fueron ajustados utilizando el modelo de dispersión axial (MDA). El MDA es un modelo de flujo en pistón con cierto grado de retro mezclado de fluido, independiente de la posición del reactor, cuyas contribuciones a la dispersión en la dirección axial pueden describirse por una expresión análoga a la Ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{ec. 2}$$

En forma adimensional la ecuación diferencial básica se transforma en:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{uL} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} \tag{ec. 3}$$

El grupo adimensional $\left(\frac{D}{uL} \right)$, denominado módulo de dispersión, es el parámetro que mide el grado de dispersión axial. Así, valores tendiendo a cero de este parámetro representan pequeñas desviaciones respecto al flujo pistón y valores grandes representan gran dispersión por lo que el sistema se comporta como un tanque agitado. También se suele utilizar el numero de Peclet definido como la inversa del módulo de dispersión.

Utilizando las condiciones de contorno e iniciales adecuadas se puede obtener una solución analítica para la curva de distribución de tiempos de residencia que se ajusta a la ecuación 4.

$$E(\theta) = \sqrt{\frac{Pe}{4\pi\theta^2}} \exp\left[-\frac{Pe(1-\theta)^2}{4\theta}\right] \tag{ec. 4}$$

En la Figura 8 se muestra la evolución temporal de la distribución de tiempos de residencia utilizando este modelo. Se puede observar claramente que al aumentar el tiempo de vida del relleno el número de Pe disminuye lo que indica un aumento en la dispersión axial del fluido tratado. Esto se debe posiblemente a que el retromezclado debido a elementos porosos aumenta al aumentar la heterogeneidad del relleno con el paso del tiempo.

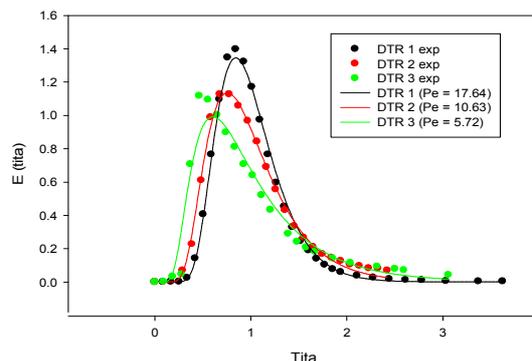


Figura 8. Curvas de distribución de tiempos de residencia (MDA).

Los resultados obtenidos a partir de las superficies de respuesta permiten predecir las concentraciones de Fe(II) a la salida de la columna para diferentes condiciones de trabajo, otorgando una valiosa herramienta para el diseño de procesos continuos de remoción que operen eficientemente. Por otro lado el comportamiento observado en cuanto a las variaciones temporales de conductividad de hidráulica y distribución de tiempos de residencia permite determinar el tiempo de

operación del relleno utilizado.

REFERENCIAS

- [1] O. Levenspiel, *Ingeniería de las reacciones químicas*, Tercera edición, Limusa Wiley, México, **2004**.
- [2] W.L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriot, *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*, Cuarta edición, Mc Graw Hill, **1991**.