

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Durante la fase experimental quedó demostrada la posibilidad de extender no sólo el rango de operación del pH (hacia valores próximos a la neutralidad) para los procesos fotoasistidos mediante FeOx-H₂O₂, sino el de la carga de contaminante manejada (200-800 mg/L). Los resultados alcanzados en ésta investigación, superan en varios órdenes de magnitud, dos a siete veces en promedio (Momani, 2003; Rodríguez, 2003; Noguerira et al., 2002), las cantidades tratadas de residuos fenólicos aún en condiciones de acidez por procesos foto Fenton sin una pérdida significativa en la velocidad de eliminación del contaminante o en el grado de mineralización del fenol. Las condiciones operativas determinadas en las pruebas tipo batch estancadas (reactores A de 20 cm³), trabajaron de manera eficiente en el reactor de flujo cerrado (tipo B de 1200 cm³) mostrando una factibilidad prometedora para el escalamiento del fotorreactor a escala piloto.

En ninguno de los casos de fototratamiento asistido con FeOx-H₂O₂ de soluciones sintéticas de fenol se obtienen buenos resultados de remoción de fenol y de mineralización de la solución para bajas concentraciones de agente oxidante. El sistema FeOx al igual que las demás variantes de los procesos Fenton son altamente dependiente del agente oxidante empleado. A partir de las condiciones operativas manejadas en éste proyecto podemos concluir que la capacidad de generación in situ de peróxido por los sistemas FeOx es incapaz de garantizar la remoción de fenol en niveles de concentración entre 184-733 ppm.

Los procesos foto Fenton asistidos con Fe³⁺ y con hierro cero valente en condiciones de acidez (pH=3) en los reactores tipo A y C mostraron un desempeño superior en lo referente a la velocidad de desaparición del contaminante objetivo (fenol) y la de sus productos de degradación en comparación con los procesos FeOx-H₂O₂ a pH natural (pH=5-6). Tales sistemas presentaron en todos los casos mineralizaciones superiores al 98% de la materia orgánica presente durante la primera hora de fototratamiento y la eliminación total del fenol en los 15 primeros minutos de tratamiento cuando se trataron 500 ppm de fenol. El sistema foto Fenton se caracteriza por mantener un pH constante dentro del periodo de tratamiento y un efluente final incoloro. Como desventaja se presenta la necesidad de una etapa subsecuente de neutralización para la disposición final del efluente tratado en un cuerpo de agua o en un sistema de alcantarillado urbano.

Los procesos fotoasistidos estudiados en éste proyecto representan una solución altamente eficiente para la remoción de contaminantes biorecalcitrantes en condiciones de neutralidad o acidez debido a la velocidad de degradación de los contaminantes, a su alto grado de mineralización y a la posibilidad de escalamiento de los mismos. Adicionalmente se trata de sistemas flexibles y económicos, que hacen uso de de la radiación solar como vector de descontaminación, lo que en un principio los convierten en alternativas ambientalmente limpias.

Como una limitación a los procesos avanzados de oxidación estudiados (FeOx-H₂O₂ y foto Fenton mediado con Fe³⁺ y Fe⁰) es la necesidad de operar el sistema de fototratamiento en un rango horario fijo. Por lo tanto, se hace necesario la presencia de una gran área de captación para que el sistema pueda ser aplicado a nivel industrial.

A partir de un análisis general de los resultados podemos decir que los procesos electroquímicos con electrodos DSA (Ti/SnO₂ y Ti-TaO_x) resultan poco eficientes para la degradación de compuestos de tipo fenolico bajo las condiciones estudiadas en éste trabajo, en comparación con otras alternativas como los procesos avanzados de oxidación fotoasistidos. Se debe recordar que el proceso electroquímico se encuentra limitado seguramente por la transferencia de masa dadas

las bajas concentraciones de fenol empleadas. Esto conduce a una baja eficiencia del proceso en términos de energía consumida y de mineralización del componente.

Dadas sus características de flujo, el filtro prensa (reactor D) reduce los problemas de transferencia de masa, pero presenta un nuevo problema, la presencia de zonas muertas, es decir, zonas dentro del circuito de flujo donde no hay reacción (tanque mezcla, mangueras, etc.). Lo anterior se ve reflejado en bajas velocidades de degradación como lo indican los valores determinados para las constantes cinéticas Ti/SnO₂ ($k=0.2595 \text{ h}^{-1}$) y Ti-TaO_x ($k=0.0364 \text{ h}^{-1}$).

A diferencia de los procesos electroquímicos, los procesos fotoquímicos no presentan limitaciones de transferencia de masa, ya que se trata de sistemas básicamente homogéneos, pero persiste el problema de zonas con velocidades de reacción más bajas debido a la ausencia de radiación solar. En éste caso, la reacción dominante sería de tipo Fenton que tiene buenas tasas de degradación en fase oscura en condiciones de acidez, pero con grados de mineralización inferiores hasta en un 40% comparados con los procesos mediados con radiación solar convencionales (Fe³⁺-H₂O₂, FeOx-H₂O₂ a pH ácido y TiO₂-H₂O₂).

Un aumento en la concentración de los contaminantes y la presencia de agentes secuestrantes (cloruros, sulfatos, etc.) implican en sistemas fotoquímicos un aumento de la dosis de reactivos y la pérdida notable de eficiencia en el tratamiento. La presencia de cloruros en un sistema de tipo electroquímico podría causar en condiciones de neutralidad la generación de especies oxidantes como hipoclorito que mediarían de manera favorable en el proceso de degradación de contaminantes tóxicos (Parra, 2001).

Para el caso de tratamiento de lixiviados de relleno sanitario maduros, los sistemas FeOx-H₂O₂ a pH natural en el reactor B, mostraron una gran eficiencia en la remoción de color expresado como una disminución de la absorbancia a 500 nm, alcanzando un 56% en la primera hora y 76% al final de la tercera hora. El proceso presenta como ventaja asociada que no se generan lodos durante el tratamiento y el uso de radiación solar para la descontaminación de un efluente con alto impacto ambiental.

El grado de mineralización alcanzado durante la prueba (28%), es inferior al reportado para procesos foto Fenton en medio ácido reportados en literatura (30-40%), pero si se tiene en cuenta que el porcentaje de mineralización en tales procesos incluyen la materia eliminada por el cambio de pH al inicio del fototratamiento, los procesos FeOx-H₂O₂ resultan bastante atractivos como alternativa para la descontaminación de lixiviados de relleno sanitario. Para el caso en que se realice una acidificación del efluente tratado mediante procesos FeOx-H₂O₂ a pH natural, la mineralización del sistema alcanza un 40% sin la presencia de grandes cantidades de precipitados.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados alcanzados en éste trabajo, es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones para completar la tarea de investigación en el tratamiento de aguas residuales recalcitrantes mediante Procesos Avanzados de Oxidación:

Identificación rigurosa de los productos de degradación del fenol en procesos FeOx-H₂O₂ a pH natural mediante la selección de las condiciones de operación en HPLC (fase móvil, tipo columna, longitud de onda, etc.). El objetivo es establecer un mecanismo de degradación y proponer un modelo matemático susceptible a ser optimizado.

Estudiar las diferencias en las rutas de degradación para los procesos FeOx-H₂O₂ a pH ácido y pH natural. Mediante el uso de reactores batch de flujo cerrado.

Instrumentación y optimización de la operación de un colector solar tipo CPC de flujo cerrado para el tratamiento de efluentes recalcitrantes.

Evaluación del efecto del material de construcción para los tubos de captación en la eficiencia de degradación de un contaminante modelo. Se recomienda en este punto el uso de materiales como: PYREX®, cuarzo, vidrio comercial y plexiglás. Asimismo, es recomendable estudiar el efecto de la pérdida de eficiencia asociada a las incrustaciones de materiales sobre los tubos.

Desarrollo de sistemas híbridos para el tratamiento de aguas recalcitrantes mediante el acoplamiento de procesos fotoasistidos y sistemas biológicos de tipo: aerobio o anaerobio en reactores SBR.

Tratamiento de efluentes reales industriales mediante procesos asistidos con radiación solar en sistemas CPC y evaluación del efecto de la presencia de agentes secuestrantes en la eficiencia de degradación de la muestra.