

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este capítulo es definir las metas del trabajo así como la metodología de investigación que garantice la selección de una alternativa de tratamiento aceptable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

Se presenta además una revisión del estado del arte de los últimos 20 años aproximadamente de las tecnologías avanzadas de oxidación relacionadas con el tratamiento de efluentes recalcitrantes, principalmente compuestos aromáticos y lixiviados maduros de rellenos sanitarios

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del proyecto consiste en determinar las mejores condiciones de operación para el tratamiento de aguas biorecalcitrantes mediante procesos avanzados de oxidación. Para lograr el objetivo se evaluará el desempeño de procesos electroquímicos y fotoquímicos asistidos con luz solar natural en sistemas batch y de flujo cerrado, usando como compuesto de referencia soluciones sintéticas de fenol en un intervalo de concentraciones entre (200-800 ppm). Finalmente se aplicará las tecnologías seleccionadas para el tratamiento de un efluente real (lixiviado maduro de relleno sanitario)

1. Diseño y construcción de un reactor fotocatalítico tipo batch para la determinación de las condiciones operativas que garanticen la mayor tasa de mineralización o biocompatibilización de la solución fenólica en condiciones próximas a la neutralidad. Las principales variables a estudiar en esta etapa son:
 - 1.1 Tiempo de residencia y/o energía captada por el reactor.
 - 1.2 Efecto de la presencia o ausencia de aire.
 - 1.3 Efecto de la concentración de H_2O_2 .
 - 1.4 Efecto de la concentración de fenol expresada como DQO en (mg O_2/L).
 - 1.5 Efecto de las relaciones: (contaminante/ferrioxalato) y (H_2O_2 /contaminante).
2. Diseño y construcción de un reactor para el fototratamiento de aguas fenólicas sintéticas tipo CPC (colector parabólico compuesto) operando en flujo cerrado y validación de las condiciones operativas determinadas a escala batch.
3. Diseño y construcción de un reactor para el tratamiento de aguas fenólicas sintéticas y de lixiviados maduros de relleno sanitario de 300 cm³ con hierro cero valente operando en flujo cerrado.
4. Determinar la eficiencia de los procesos fotocatalíticos mediante seguimiento de:
 - 4.1 DQO (grado de mineralización).
 - 4.2 DBO₅ (demanda biológica de oxígeno).
 - 4.3 Tasa de biodegradabilidad (DBO₅/DQO).
 - 4.4 Energía consumida por kilogramo de contaminante destruido.
 - 4.5 Toxicidad respirométrica.
5. Determinación de las condiciones de operación para el tratamiento de aguas fenólicas sintéticas mediante un reactor electroquímico tipo filtro prensa operando en flujo cerrado y con bajas concentraciones de contaminante. Las actividades principales en esta etapa son:
 - 5.1 Caracterización voltamétrica de los electrodos.
 - 5.2 Selección del tipo de electrodo más adecuado. Ti/ SnO_2 , Ti/ Ta_xO_x .
 - 5.3 Tiempo de tratamiento.
6. Desarrollo de las técnicas analíticas para el seguimiento y evaluación del desempeño de los procesos fotocatalíticos en el tratamiento de efluentes recalcitrantes.
 - 6.1 Determinación del peróxido residual.
 - 6.2 Determinación de la DQO mediante técnicas espectrofotométricas.
 - 6.3 Determinación cuantitativa mediante HPLC de los principales productos de degradación y del compuesto de interés.
 - 6.4 Seguimiento de la reducción del color mediante técnicas espectrofotométricas.

2.2 JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

En los últimos años han surgido los denominados Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), que posibilitan la mineralización total o parcial de compuestos orgánicos; es decir, producen agua, dióxido de carbono y ácidos orgánicos. Estos procesos se basan en la generación de radicales libres altamente reactivos tal como el radical hidroxilo. El espectro solar comienza prácticamente en 300 nm y solamente el 4,5 % de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se encuentra en el rango ultravioleta (300-400 nm). Por lo tanto, cualquier sistema de descontaminación que utilice la radiación solar debe basarse en una sustancia absorbidora activa a partir de 300 nm. Esta situación restringe la aplicación de los procesos de descontaminación basados en el uso de peróxido de hidrógeno y ozono con radiación UV solar, ya que estos dos compuestos absorben radiación por debajo de 300 nm (Rossetti et al., 2001). En los últimos diez años, se han realizando investigaciones sobre nuevos PAOs, en el que la generación de radicales hidroxilo puede iniciarse mediante la absorción de radiación solar por medio de complejos férricos y peróxido de hidrógeno (reacción de foto- Fenton asistida con Radiación Solar).

El ferrioxalato, por ejemplo, es uno de estos complejos, y ha sido usado como actinómetro químico durante décadas, ya que absorbe radiación hasta 500 nm. Por lo tanto, la utilización de este complejo férrico para la destrucción de contaminantes orgánicos vía reacción de foto-Fenton asistida con radiación solar, tiene la ventaja de aprovechar tanto la radiación solar ultravioleta como parte de la visible (Hislop et al., 1999; Nogueira et al., 2002).

El creciente interés y la preocupación, a escala mundial, en relación a los problemas de contaminación medioambiental, unido a las expectativas de viabilidad tanto técnica como económica, han impulsado en los últimos años de forma importante las distintas aplicaciones industriales de la tecnología solar (Blanco et al., 2003).

Los compuestos orgánicos son degradados de forma natural por la luz del sol cuando se encuentran en la atmósfera, disueltos en agua, adsorbidos en superficies minerales, o se encuentran sobre las plantas. Estos ejemplos naturales de procesos fotoquímicos pasivos (sin la intervención humana) muestran el papel que puede jugar la luz solar en la destrucción medioambiental de contaminantes. El problema al que se enfrentan actualmente los investigadores, es el desarrollo de sistemas tecnológicos que puedan usar estos procesos de forma eficiente y económica para el tratamiento de problemáticas medioambientales y efluentes industriales (Blanco et al., 2003).

La tecnología para llevar a cabo el proceso de fototratamiento es además muy simple y se basa en colectores modificados únicamente para optimizar la eficiencia óptica en la captación de la radiación solar UV. De la experiencia obtenida por el CIEMAT en la PSA, los captadores tipo CPC, han dado un resultado óptimo por su sencillez, simplicidad y bajo coste (Blanco et al., 2003).

El colector parabólico compuesto (CPC) está compuesto de 2 superficies parabólicas que tienen como foco el mismo eje, lo que permite concentrar la radiación que llegue al CPC con una inclinación menor que su ángulo de aceptación. El ángulo de aceptación debe permitir captar en el eje la mayor cantidad de luz incidente, combinando adecuadamente diámetro del eje y profundidad de CPC (Blanco et al., 2003).

Teniendo en cuenta la información presentada con anterioridad, en éste trabajo, se estudiará la degradación de un compuesto orgánico modelo (fenol) en solución acuosa y en condiciones próximas a la neutralidad por medio de la reacción con ferrioxalato (radiación UV, sales de hierro y peróxido de hidrógeno) empleando radiación solar natural. La reacción se llevará a cabo en un reactor CPC, sin mezclado y operado en forma discontinua y no isotérmica a temperatura ambiente, seguidamente se experimentará en dos reactores de flujo cerrado a partir

de las condiciones de operación obtenidas a escala batch. Adicionalmente, se llevará a cabo un estudio experimental con la finalidad de determinar la influencia de las relaciones de: H_2O_2 /fenol y de ferrioxalato/ Fe^{3+} , sobre la degradación del contaminante.

El caso de los lixiviados merece una atención especial. Como ejemplo está el Distrito Federal, ya que la época de lluvias sumado a las 12 mil toneladas de basura que genera a diario en la Ciudad de México, son la combinación necesaria para crear los lixiviados de rellenos sanitarios, uno de los contaminantes más peligrosos para el medio ambiente, en particular para los mantos acuíferos (SEMARNAT, 2000). A pesar de la peligrosidad de estos contaminantes, fue hasta hace unos años cuando se les empezó a dar atención para poder contrarrestar el impacto negativo que causan al medio ambiente.

2.3 ESTADO DEL ARTE DE LOS PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Como un aporte adicional, se presenta una revisión del estado del arte en lo que hace referencia al tratamiento de compuestos aromáticos mediante Procesos Avanzados de Oxidación (ver tabla 11). Los procesos electroquímicos y fotoquímicos, (considerados como PAOs), surgen como una alternativa atractiva ya que garantizan una razonable reducción a bajos costos de la DQO (medida del contenido de carbono). Además de los procesos foto Fenton y los fotoasistidos con electrodos dimensionalmente estables (DSA) acoplados con sistemas biológicos se encuentran en esta categoría (Blanco et al., 2000; Parra, 2001; Blanco et al., 2003).

La mayoría de trabajos presentados en la tabla 11 involucran el tratamiento mediante procesos electroquímicos de soluciones sintéticas de compuestos aromáticos en condiciones batch mediante electrodos DSA. Se debe destacar entre ellos el trabajo realizado por Casado y colaboradores (2005) que implica el uso de sistemas de flujo cerrado a escala piloto para el tratamiento de nitroaromáticos, y el uso de una combinación de procesos electroquímicos y fotoquímicos operando de manera secuencial. Es importante mencionar sobre los experimentos realizados por Casado y colaboradores (2005) la gran ventaja que representa el uso de procesos fotoquímicos mediados con radiación solar en comparación con los procesos de tipo electroquímico. Zhou y colaboradores (2005), presentan un estudio sobre la eficiencia de la degradación en electrodos modificados tipo $\beta\text{-PbO}_2$, en función de la concentración del contaminante, se hace evidente para este tipo de procesos la necesidad de tiempo elevados de tratamiento, lo que perjudica en un principio la aplicación de la tecnología. Cañizares y colaboradores (1999) estudian el efecto de la concentración de soluciones sintéticas de fenol en ánodos de acero y carbón activado en sistemas de flujo cerrado, el esquema empleado por los autores implican básicamente dos procesos: oxidación y adsorción para la remoción del contaminante.

En lo referente a procesos asistidos con radiación Uv-vis, es importante destacar los trabajos de: Safarzadeh-Amiri y colaboradores (1996) en la eliminación mediante sistemas $\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$ de compuestos aromáticos a bajas concentraciones y a pH ácido; las investigaciones de Kwan y colaboradores (2003) en la degradación de 2,4-D en medio ácido; Nogueira y colaboradores (2002) utilizan procesos tipo Fenton en la remoción de aromáticos sustituidos mediante procesos asistidos con radiación solar al igual que Momani (2003). Los trabajos de Yoon y colaboradores (2004-2005) implican el uso de rangos de pH próximos a la neutralidad para la remoción de contaminantes en bajas concentraciones mediante sistemas FeOx y estudian a su vez el efecto de la especiación en la eficiencia de tales procesos.

Finalmente es importante mencionar el trabajo de Tratnyek y colaboradores (1996) que hace un estudio de la degradación de nitroaromáticos mediante hierro cero valente. Dicho trabajo presenta una perspectiva interesante para este tipo de procesos en la remediación de aguas subterráneas.

En lo referente al tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, se destacan los aportes de Wang et al., (2001) en la foto oxidación, los de Kang et al., (2000) en procesos Fenton. Asimismo, Lopez et al., (2004) estudiaron los procesos Fenton para el tratamiento de lixiviados biorecalcitrantes con relaciones ($H_2O_2/Fe^{2+}=12$) con las que consiguió aumentar la biodegradabilidad hasta 0.5 en dos horas. Wang et al., (2002) trabajaron oxidación avanzada mediante O_3 y H_2O_2 , usando coagulación como pretratamiento. Por otro lado, Ramírez et al., (2004) encontraron que uno de los principales problemas durante el tratamiento con ozono y agua oxigenada fue la formación de ácidos carboxílicos que interferían en el proceso de mineralización. Bila et al., (2005) emplearon igualmente ozono para el tratamiento de lixiviado estabilizado, pero una vez más no se obtuvieron tasas de mineralización apreciables. Los mejores resultados se han conseguido combinando los sistemas mencionados con procesos de coagulación-floculación. Qureshi et al., (2002) usaron como generador de radicales libres, el peróxido de hidrógeno para tratamiento de lixiviados; uno de los principales problemas de esta clase de sistemas son los altos consumos energéticos. Koh et al., (2004) trataron lixiviados de rellenos sanitarios (residuos industriales y urbanos) por medio de radiación ultravioleta (UV) y H_2O_2 , logrando remociones en DQO cercanas al 60% y alcanzando razones de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) entre 0.15-0.16. Cho et al., (2004) usaron lixiviados pretratados biológicamente mediante procesos fotocatalíticos heterogéneos (TiO_2) y lograron reducciones en la DQO cercanas al 80% en cinco horas de tratamiento. Asimismo, de Morais et al., (2005) reportan remociones de DQO en el intervalo de 45-50%, para el tratamiento de lixiviados antiguos por medio de sistemas Fenton asistidos por radiación ultravioleta artificial (sistemas: UV-Ozono, UV- H_2O_2 , UV- TiO_2 , Procesos Fenton y foto Fenton).

Para el caso de los lixiviados de relleno sanitario, en la tabla 12 se presentan los resultados de la revisión bibliográfica orientada al tratamiento con procesos avanzados de oxidación, a excepción de los trabajos de Cho et al., 2002; los estudios han sido realizados sobre muestras estabilizadas mediante procesos biológicos y con valores de DQO bastante bajos.

Tabla 11. Resumen de los trabajos reportados en la literatura usando efluentes tipo fenólico.

Tipo de Contaminante.	Características del Sistema	Tipo de Reactor	Volumen Reacción [cm³].	Concentración contaminante [ppm].	Proceso Empleado. Objetivo del trabajo.	Autores
Nitroaromáticos	Medio sintético.	Batch flujo cerrado	-	80-600.	Sistemas Electro Foto Fenton	Casado et al., 2005.
Fenol	Medio sintético.	batch	80.0	100-490.	Sistemas electroquímicos. Diferentes electrodos	Xiao-yan Li et al., 2005.
Fenol	Medio sintético.	Batch.	550.0	100-800.	Mecanismo de degradación.	Zhou et al., 2005.
p-Clorofenol	Medio sintético.	Batch.	150.0	-	Efecto del tipo de ánodo en la degradación del contaminante.	Zanta et al., 2003.
p-Nitrofenol	Medio sintético.	Batch.	150.0	380.	Mineralización mediante sistemas Foto Electro Fenton	Oturan et al., 2000.
Fenol	Medio sintético.	Batch.	330.0	100-400.	Mineralización con electrodos de PbO ₂ .	Zucheng et al., 2001.
p-Clorofenol	Medio sintético.	Batch.	200.0	46.	Proceso sono-químico para la degradación de contaminantes.	Xian-wen et al., 2005.
Fenol	Sintético-Real	Batch.	300.0	50.	Proceso Electro fotoquímico	Pelegri et al., 2001.
Fenol	Medio sintético.	Batch.	500.0	10-100.	Proceso Electroquímico.	Idris et al., 2002.
Fenol	Medio sintético.	Batch.	500.0	200-1800	Proceso Electroquímico. Electrodos de Diamante	Cañizares et al., 2002.
2,4-diclorofenol	Medio sintético.	Batch.	-	600.	Degradación Sonoelectroquímica de contaminantes	Padilla et al., 2004.

Tabla 11. Resumen de los trabajos reportados en la literatura usando efluentes tipo fenólico (continuación).

Tipo de contaminante.	Características del Sistema	Tipo de Reactor	Volumen Reacción [cm³].	Concentración contaminante [ppm].	Proceso Empleado. Objetivo del trabajo.	Autores
Fenol	Medio sintético.	Batch-flujo cerrado	1000.0	90-120.	Sistemas Electro Foto Fenton radiación artificial.	Jiménez et al., 2002.
Fenol	Medio sintético.	Batch	80.0	100-490.	Sistemas electroquímicos. Diferentes electrodos	Xiao-yan Li et al., 2005.
Fenol	Medio sintético.	Batch-flujo cerrado	268.0	1750.0	Proceso Electroquímico. Electroodos Acero-carbón activado	Cañizares et al., 1999.
Clorofenol	Medio sintético.	Batch-flujo cerrado	1000.0	100.0	Proceso Electroquímico. Generación in situ de oxidantes.	Yan-quiring et al., 2003.
Fenol	Medio sintético.	Batch	2000.0	3500.0	Modelamiento matemático conversión.	Tanyolac et al., 2003.
2,4-D Acido diclorofenoxiacetico	Medio sintético.	Batch	100.0	230.0	Mineralización mediante PAOs	Brillas at al., 1999.
Clorofenoles	Medio sintético.	Batch	-	50-100.	Oxidación electroquímica.	Bunce at al., 1999.
p-Nitrofenol	Medio sintético.	Batch	200.0	50.0	Mineralización mediante Ozonización y ultrasonido	Xian-wen et al., 2005.
Fenol.	Medio sintético.	Batch	330.0	100-400.	Oxidación electroquímica. Electroodos modificados de Pb.	Zu-cheng et all., 2001.

Tabla 11. Resumen de los trabajos reportados en la literatura usando efluentes tipo fenólico (continuación).

Tipo de Contaminante.	Características del Sistema	Tipo de Reactor	Volumen Reacción [cm³].	Concentración contaminante [ppm].	Proceso Empleado. Objetivo del trabajo.	Autores
Cresoles.	Medio sintético.	Batch	500.0	100-500.	Oxidación electroquímica	Palanivelu et al., 2003.
Fenol	Medio sintético.	Batch-flujo cerrado	300.0	100.0	Foto Fenton. Radiación UV artificial.	Feng et al., 2003.
Nitroaromáticos.	Medio sintético.	Batch-flujo cerrado	60.0	-	Hierro cero valente	Tratnyek et al., 1996.
Fenol	Medio sintético.	Batch-flujo cerrado	-	100-200.	Mineralización mediante PAOs	Al momani et al., 2003.
Fenol	Medio sintético.	Batch	-	50	Fototratamiento Ferrioxalatos	Nogueira et al., 2003.
BTX-MTBE-1,4-D	Medio sintético-real.	Batch-Flujo cerrado	24000.0	7-20-100	Fototratamiento lámpara UV Ferrioxalato	Safarzadeh Amiri et al., 1996
Orgánicos	Medio Sintético	Batch	-	-	Estudio generación radicales hidroxil	Hislop et al., 1999
E. Coli	Medio Sintético	Batch	60.0	no aplica	Inactivación E. Coli mediante Ferrioxalato	Yoon et al., 2003.
2,4-D Acido diclorofenoxiacetico	Medio Sintético	Batch	50.0	220	Fotodegradación lampara UV. Complejos hierro	Kwan et al., 2003
2,4-D Acido diclorofenoxiacetico	Medio Sintético	Batch-Flujo cerrado	500.0	20	Fototratamiento lámpara UV Ferrioxalato	Yoon et al., 2004.
2,4-D Acido diclorofenoxiacetico	Medio sintético.	Batch	500.0	1.00	Fototratamiento lámpara UV Ferrioxalato	Yoon et al., 2005.

Tabla 12. Resumen de los trabajos reportados en la literatura para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.

Tipo de Proceso	COD_i [mg O₂/l]	COD_f [mg O₂/l]	Remoción COD [%]	Costo [dólares /Kg DQO]	Características del Lixiviado	Autores
Ozono [O ₃]	1511	1012	33	1328	Estabilizado	Monje-Ramirez et al., 2004.
UV-TiO ₂	1409	282	80	719	Estabilizado	Cho et al., 2002.
O ₃ -H ₂ O ₂	1440	905	37.2	7894	Estabilizado	Wang et al., 2002.
Electroquímico	1610	209	87	5.5	Estabilizado	Wang et al., 2001.
Electroquímico	1042	313	70	13.6	Estabilizado	Chiang et al., 2001.
Electroquímico	1134	262	77	11.6	Estabilizado	Chiang et al., 2001.
Fenton	1500	450	70	1.23	Estabilizado	Wang et al., 2001.
Fenton	1550	450	72	1.78	Estabilizado	Gau et al., 2001
Foto Fenton	4000-5000	-	32.9	No especificado	Estabilizado	Lopes de Morais 2005
TiO ₂ Suspensión	700-840	-	79	No especificado	Estabilizado	Cho et al., 2004.
FeOx	1400-1600	-	28	No especificado	Muestra cruda	Proyecto UIA
UV/H ₂ O ₂	4000-5000	-	43	No especificado	Estabilizado	Lopes de Morais 2005
UV/ TiO ₂	4000-5000	-	44	No especificado	Estabilizado	Lopes de Morais 2005
Foto Fenton	1150	-	70	No especificado	Estabilizado	Kim et al., 1998.

Tabla 12. Resumen de los trabajos reportados en la literatura para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios (continuación).

Tipo de Proceso	COD_i [mg O₂/l]	COD_i [mg O₂/l]	Remoción COD [%]	Costo [dólares /Kg DQO]	Características del Lixiviado	Autores
Fenton-Coagulación	3530	-	80	No especificado	Estabilizado	Rivas et al., 2004.
Electro Fenton	950	-	68	No especificado	Muestra cruda	Cho et al., 2002.
Fenton Convencional	1100	-	63	No especificado	Estabilizado	Bae et al., 1997.

2.4 APORTES DEL PROYECTO AL ESTADO DEL ARTE

En lo referente al tratamiento de corrientes fenólicas, el trabajo propuesto se caracteriza por el uso del sistema de ferrioxalato como medio de descontaminación en condiciones de neutralidad para la generación de radicales ($\text{HO}\bullet$); y presenta los siguientes aportes al estado del arte de los procesos avanzados oxidación, con base en la revisión bibliográfica descrita con anterioridad:

1. Se trata de un sistema de flujo cerrado de oxidación fotoquímica ambientalmente limpio (radiación solar) para el tratamiento corrientes fenólicas mediante complejos tipo ferrioxalato a pH natural (5.5-6.5) en presencia de H_2O_2 . Hasta la fecha los trabajos presentados operan en condiciones ácidas ($\text{pH} < 3$), rango que esta fuera de las condiciones finales de muchos de los efluentes industriales conocidos e implican a la vez una modificación sustancial de la matriz acuosa a tratar.
2. Las concentraciones de las aguas fenolicas bajo estudio, se encuentran en el rango de 200-800 ppm, que se ubica entre los límites de operación de un complejo petroquímico (concentraciones mayores a 400 mg/L), lo que implica en principio un aporte a la solución de un problema real. A partir de las referencias mostradas en la tabla 11 podemos decir que no se cuenta con un estudio que aborde dicha problemática y en la mayoría de los casos lo que se busca es conocer las posibilidades del sistema de ferrioxalato/ H_2O_2 en la descontaminación de aguas residuales diluidas.
3. Se buscó trabajar con concentraciones bajas de hierro (< 80 ppm) para hacer flexible al sistema, no requiriéndose de un postratamiento para su recuperación.
4. El trabajo implica a su vez el estudio del efecto de las relaciones: $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_2$, en la capacidad de degradación del contaminante seleccionado y de los subproductos generados.

Cabe mencionar que en los trabajos reportados en la literatura, se usaron sales de hierro con estado de oxidación (2+) para inducir el proceso foto Fenton, mientras que en el presente trabajo se usaran sales de de hierro con estado de oxidación (3+), debido a que la fotorreducción de la especie toma lugar en longitudes de onda en el rango de 320-480 nm, lo que conduce a un mayor aprovechamiento de la radiación solar incidente en el colector (Nogueira et al. 2002; Kwan et al., 2003; Sarria 2003; Rodríguez 2003). Igualmente se llevarán a cabo pruebas con hierro cero valente (Fe^0) para la descontaminación de aguas fenólicas (500 ppm en un circuito de flujo) y de un sistema real (lixiviado de relleno sanitario).

En lo referente al tratamiento de lixiviados maduros de rellenos sanitarios, se presentan los siguientes aportes al estado del arte de los procesos avanzados oxidación, con base en la revisión bibliográfica descrita en la tabla 12.

1. Se trata de un sistema de flujo cerrado de oxidación fotoquímica (radiación solar) para el tratamiento de lixiviados no estabilizados mediante complejos tipo ferrioxalato.
2. Se estudiarán específicamente lixiviados no pretratados, por lo tanto, los contaminantes se encuentran en concentraciones elevadas. Se ha reportado (Englehardt et al., 2006) una serie de estudios sobre el tratamiento con hierro cero valente de lixiviados estabilizados biológicamente, con reducciones de la DQO cercanos al 50% después de 27 horas de tratamiento, pero no se reporta nada sobre sistemas no pretratados asistidos por luz solar y utilizando ferrioxalato como generador de especies $\text{HO}\bullet$.

3. La metodología de trabajo propuesta no implica un cambio marcado en la matriz de la solución a tratar (pH, concentración) lo que la hace económicamente viable y técnicamente aceptable.

La metodología de trabajo se puede agrupar en dos grandes actividades. La primera esta relacionada con una revisión del estado del arte de los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), y de los Procesos Avanzados Fotoasistidos, cuyo objetivo final es la búsqueda de uno o más procesos capaces de garantizar un efluente tratado con un elevado grado de mineralización de los compuestos orgánicos recalcitrantes o la biocompatibilización del efluente para su inyección en un proceso de tratamiento convencional (biológico, por ejemplo). El resumen de dicho esquema se presenta en la figura siguiente.

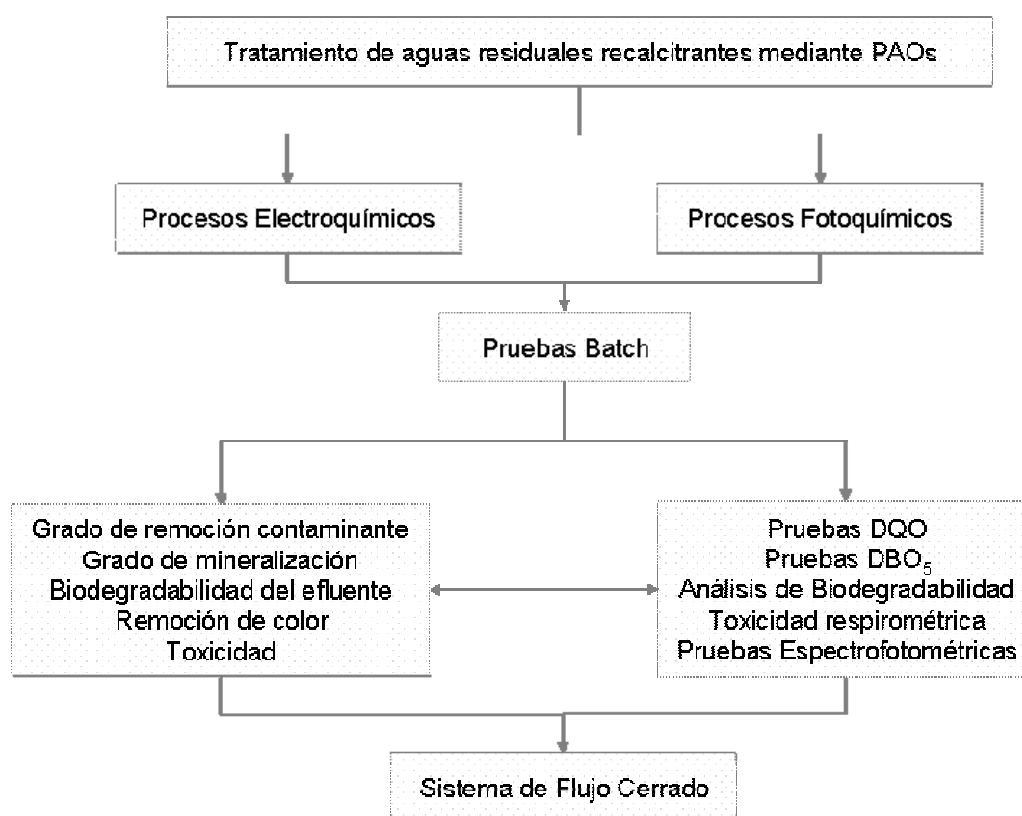


Figura 12. Metodología para la evaluación de la eficiencia del proceso.