

**Remoción y Rutas de Evacuación de Hormonas en Sistemas de Tratamientos Biológico
Convencionales de Aguas Residuales Municipales**

Nayith Elvira Montoya Zayas

**Trabajo de Grado Presentado como Requisito para optar el Título de
Especialista en Química Ambiental.**

Director

Alexander Meneses Jacome

M.Sc. Química del Ambiente y la Energía

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

En primer lugar, quiero darle gracias a Dios por permitirme culminar una nueva meta propuesta como proyecto de vida.

A mis padres (Socorro y Jorge) que siempre me han apoyado en los momentos que más he necesitado de ustedes e infinitas gracias por sus grandes enseñanzas.

A mi hija (Gaby) que es mi motor y mis ganas de ser cada día mejor profesional.

A mis hermanos (Fanny, Faber y Jorge) en especial a María quien es mi compañera incondicional, la que cada día me brinda su apoyo y siempre está a mi lado deseándome lo mejor. Gracias infinitas por hacer parte de mi vida.

A mi compañero de vida (Marco A.) el que Dios me ha regalado como apoyo incondicional, el que desde la distancia siempre está pendiente de mí deseándome que todo me salga bien, el que siempre ha confiado en mis capacidades para salir adelante.

Agradecimientos

La presente monografía fue dirigida por el Ph.D. Alexander Meneses Jácome a quien le agradezco por su paciencia, dedicación, apoyo, disposición y su valioso tiempo en la elaboración de este documento, mi más sincera admiración por ser un doctor íntegro y trasmisor de conocimientos.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Planteamiento del Problema	14
2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Marco Teórico.....	18
3.1 Compuestos Disruptores Endocrinos.....	18
3.2 Tratamiento Biológico Convencional de Aguas Residuales.....	20
3.3 Riesgos e Impactos por CDE	20
4. Fuentes de Compuestos Disruptores Endocrinos (Hormonas)	22
4.1 Efluentes Domésticos.....	23
4.2 Efluentes Industriales.....	25
4.3 CDE Hormonales en vertimientos directos.....	26
4.4 CDE hormonales en vertimientos tratados	27

5. Eficiencia de Remoción de CDE Hormonales en Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Convencionales.....	30
5.1 Lodos Activados	31
5.2 Reactor Anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos (UASB).....	33
5.3 Lagunas Facultativas.....	33
5.4 Otras tendencias tecnológicas en tratamiento biológico de efluentes.....	34
6. CDE Hormonales en Lodos de Purga de Ptar Municipales	36
7. Conclusiones y Discusiones.....	39
Referencias Bibliográficas	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Estructura molecular de los principales CDE hormonales.	19
Tabla 2. Categorización de grupos aportantes de los diferentes tipos de estrógenos, Estrona E1, 17 β Estradiol E2 y 17 α Estradiol EE2.	24
Tabla 3. Eficiencia de tratamientos de lodos activados y relacionados en la remoción de estrógenos.	32

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ciclo antropogénico del agua.	22

Resumen

Título: Remoción y Rutas de Evacuación de Hormonas en Sistemas de Tratamientos Biológico Convencionales de Aguas Residuales Municipales.*

Autor: Nayith Elvira Montoya Zayas.**

Palabras Clave: Disruptores endocrinos –hormonas – PTAR- Lodos activados.

Descripción:

Los Compuestos Disruptores Endocrinos (CDE) hacen parte de uno de los más importantes grupos de contaminantes emergentes (CE). Específicamente, los compuestos de base hormonal parecen ser CDE que están atrayendo la atención de científicos y formuladores de normativas a nivel mundial, porque excedentes sintéticos de estos compuestos se usan para regular los procesos hormonales de mujeres y hembras de distintas especies animales como estrategia típica de control natal (Anticonceptivos).

Este trabajo de investigación, pretende poner al descubierto algunas de las más importantes preocupaciones ambientales a nivel mundial relacionadas con la liberación metabólica de los CDE de base hormonal en aguas residuales procedente de efluentes domésticos e industriales, enfatizando en la baja confiabilidad y eficiencia de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales típicamente utilizadas como sistemas de saneamiento municipal en Colombia, entre los tratamientos más importantes para la remoción de estos compuestos se encuentran los siguientes: los lodos activados, los reactores UASB y las lagunas facultativas. Además, las rutas de remoción de estos CDE en los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales, no ha sido determinada en nuestro contexto y en particular se requiere más investigación en este sentido para valorar la remoción de los CDE de base hormonal en los lodos de purga, así como el riesgo potencial que se encuentra asociado al uso de este material en aplicaciones de uso agrícola como enmienda o fertilizante de suelos.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: Alexander Meneses Jacome, M.Sc. Química del Ambiente y la Energía

Abstract

Title: Removal and Evacuation Routes of Hormones in Conventional Biological Treatment Systems of Municipal Wastewater.*

Author: Nayith Elvira Montoya Zayas**

Key Words: Endocrine disrupters – Hormones- PTAR- Activated sludge

Description

Endocrine Disrupting Compounds (EDC), are part of one of the most important groups of emergent pollutants (EP). Specifically, hormone-based substances seem to be a kind of EDC that is attracting the attention of environmental scientist and policymakers around the world, because synthetic surpluses of these compounds are used to regulate the hormonal processes of women and female of diverse animal species as the usual strategy for birth control.

This research work attempts to unfold some of the most important environmental concerns worldwide related to the metabolic release of hormone-based EDC in human wastewaters coming from domestic and industrial effluents, emphasizing the low reliability and efficiency of the most typical wastewater technologies used in Colombia as municipal sanitation systems. In between the most important treatments of these compounds can be found the activated sludge, the UASB reactors and the facultative ponds. Furthermore, the removal pathway of these EDC from biological wastewater systems have not been clearly studied in our context and particularly more research would be addressed to appraise the removal of hormone-based EDC in the purged sludge, as well as the potential risk associated to the use of this material in several agricultural applications as amendment or fertilizer of soils.

* Degree work.

** Science Faculty. School of Chemistry. Director: Alexander Meneses Jacome, M.Sc. Chemistry of the Environment and Energy

Introducción

La denominación de Compuestos Disruptores Endocrinos (CDE), se aplica a una amplia variedad de compuestos, cuya complejidad y heterogeneidad química dificultan la implementación de técnicas para su detección y determinación analítica, así como el establecer reglas generales de su comportamiento en el ambiente y en los seres vivos (Chang et al. 2009; Manickum & John, 2014). Por esta razón, en muchos países el impacto que estos compuestos puedan generar, no ha sido dimensionado apropiadamente, a pesar del aumento de publicaciones científicas que revelan la agudización de los problemas relacionados con su liberación y acumulación en el medio ambiente, debidos entre otros a evidencia indicativa de que los CDE al llegar a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), no son tratados de manera eficaz (Chang, Choo, Lee, & Choi, 2009; Barrios et al., 2018).

Existe la posibilidad de que en muy pequeñas concentraciones (ppb o menos), las cantidades remanentes de los CDE presentes en las aguas residuales o en los lodos que se reincorporan a los suelos como enmienda o fertilizante, sean promotores de una serie de problemáticas ambientales. En particular, cuando las PTAR no pueden proveer una adecuada remoción de estos compuestos, su descarga podría alterar el metabolismo de los organismos que interactúan con ellos (Andersen, Siegrist, Halling & Ternes, 2003). Incluso, en tratamientos como los de tipo lodos activados, donde algunos trabajos muestran que los CDE pueden ser ocasional o parcialmente biodegradados o adsorbidos en el lodo, existe la preocupación acerca de esta vía de disposición de este residuo,

dado que los CDE pueden mantener su actividad bioquímica en el entorno natural (Estrada et al., 2012).

Otra dificultad respecto a los CDE es su detección en el ambiente, debido a sus muy bajas concentraciones. Existen diferentes técnicas analíticas para la identificación de los CDE, como lo son la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, métodos biológicos y los métodos no celulares. La mayor dificultad que se presentan con estos métodos puede llegar a ser los altos costos, el tiempo requerido, la preparación de la muestra y la especificidad y la sensibilidad a distintos tipos de sustancias (Chang, Choo, Lee, & Choi, 2009).

En lo normativo más exactamente en el caso de Colombia, aunque se cuenta con una normativa ambiental y existen entidades gubernamentales encargadas de la protección de la salud de los ecosistemas y la población, el análisis de las acciones desarrolladas muestra que todas estas actividades no han sido suficientes, y es por ello que en la actualidad existe un alto número de fuentes hídricas que presentan altos niveles de contaminación orgánica, microbiana y química (Colombia, Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2008). En efecto, la norma técnica de vertimiento no incluye regulaciones sobre los CDE como contaminantes objetivo, como se puede observar en la normativa vigente (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

1. Planteamiento del Problema

En el grupo de contaminantes emergentes, la familia de los CDE merece especial atención, dado que se trata de sustancias capaces de alterar el equilibrio hormonal, en otras palabras, los CDE son compuestos que interfieren con el funcionamiento normal del sistema endocrino (Estrada *et al.*, 2012). No obstante, en el contexto colombiano no existe normatividad para su control o regulación en el ciclo del agua, a pesar de que en el mundo existe desde hace dos décadas un interés creciente sobre las problemáticas ambientales que los CDE pueden generar. También existe evidencia que revela como los tratamientos biológicos convencionales de agua residuales, tienen serias limitaciones para lograr su degradación o eliminación completa y segura (Lopez, Gil, Paz & Barceló, 2002).

Con el propósito de esclarecer los alcances de esta problemática, en esta monografía se presenta una revisión de la literatura orientada a establecer correlaciones entre el grado de efectividad en el tratamiento de efluentes domésticos o municipales, que ofrecen sistemas de lodos activados, reactores UASB y sistemas de lagunaje, es decir, las tecnologías de saneamiento hídrico de más amplio uso en el medio colombiano (Chernicharo, Van, Noyola & Ribeiro, 2015; Noyola, Padilla, Morgan, Güereca & Hernández, 2012) y las rutas de evacuación de estos compuestos de estos sistemas, sea en la forma de lodos excedentarios o como remanentes en los efluentes tratados.

De manera adicional, se presenta un análisis crítico de los niveles de concentración esperados de CDE en los lodos de purga de estos sistemas de tratamiento y de los riesgos ambientales que se

han venido identificando en el mundo, en especial cuando los lodos reciben disposición final en suelos o en uso agrícola (Manickum & John, 2014; Stumpe & Marschner, 2010)

Por consiguiente, el énfasis de esta revisión, se hace en compuestos anticonceptivos o productos para el control natal de base hormonal, que tienen la connotación de ser CDE que se introducen al ciclo del agua urbana, a través de los excrementos humanos (Estrada *et al.*, 2012) y de los efluentes de la cría masiva de animales, donde las hormonas también se usan para su engorde y crecimiento acelerado (ej. Pollos, cerdos, etc.)(Gaulke, Strand, Kalhorn & Stensel, 2009)

Existe evidencia de que estos compuestos, al llegar a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) no son tratados de manera eficaz (Manickum & John, 2014). Sin embargo, en algunas investigaciones realizadas, se han descubierto que en algunas PTAR (e. g. los lodos activados) pueden remover ciertas cantidades de estrógenos, mostrando que estos compuestos ocasionalmente pueden llegar a ser biodegradados y en otros casos adsorbidos en el lodo. No obstante, existe la preocupación acerca de la correcta disposición de este residuo, en los suelos donde los CDE pueden mantener su actividad bioquímica (Estrada *et al.*, 2012).

Es posible que incluso en muy pequeñas concentraciones (ppb o menos), remanentes de los CDE o sus metabolitos, permanezcan en las aguas residuales o en lo lodos, para luego reincorporarse a los ecosistemas y promover una serie de problemáticas ambientales, pues descargas de estos compuestos tienen el potencial de modificar el metabolismo de algunas especies animales (Ramírez, Martínez, Quiroz & Bandala, 2015).

Dada la complejidad y diversidad del problema, a nivel internacional se han adoptado distintos enfoques, especialmente a nivel de la química analítica, para la detección y cuantificación de distintos tipos de CDE. Esta es una problemática de alto nivel técnico, debido a las muy bajas concentraciones en los que estos compuestos se encuentran en el medio ambiente o en los organismos, los tiempos de respuesta de las técnicas, las interferencias sobre la medición ocasionadas por la manipulación de las muestras en varias de las técnicas disponibles y los altos costos de la mayoría de ellas, un aspecto que seguramente será tratado colateralmente, pero no en profundidad en el presente trabajo.

En este orden de ideas, la presente monografía se desarrolla luego de un breve marco conceptual, en tres (3) grandes capítulos, que tratan de dar respuesta a los objetivos planteados, así:

- ✓ Identificación de fuentes de compuestos Disruptores Endocrinos de tipo hormonal (Capítulo 4)
- ✓ Discusión acerca de la eficiencia de remoción de CDE hormonales en sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales (Capítulo 5).
- ✓ Identificación e impactos de CDE hormonales en lodos de purga de PTAR municipales (Capítulo 6).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar un análisis crítico, sobre la efectividad de procesos de tratamiento biológico convencionales en el tratamiento de CDE de tipo hormona y las problemáticas relacionadas con su evacuación en los lodos excedentarios de estos sistemas.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Describir los principales tipos de efluentes o fuentes de CDE (hormonas) en aguas residuales y las problemáticas ambientales correlacionadas con estos compuestos.
- b) Establecer a partir de la literatura el nivel de efectividad típico o promedio de sistemas de lodos activados, UASB y sistemas de lagunaje en el tratamiento de CDE (hormonas).
- c) Establecer los rangos de concentración de CDE (hormonas) en los lodos de purga de los sistemas de tratamiento en referencia.
- d) Identificar las problemáticas ambientales debidas a CDE (hormonas) en lodos de purga y su disposición en suelos y prácticas agrícolas, así como oportunidades de control o mitigación de este impacto.

3. Marco Teórico

El completo y adecuado entendimiento del presente trabajo y su contexto, requiere la ampliación conceptual de tres áreas de conocimiento, relativas a las nociones de: (i) Contaminantes emergentes con énfasis en CDE, (ii) Tratamiento biológico convencional de aguas residuales y (iii) Riesgos e impactos relativos a CDE en el ambiente.

3.1 Compuestos Disruptores Endocrinos

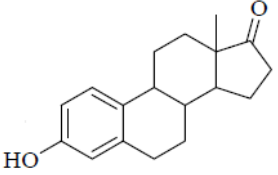
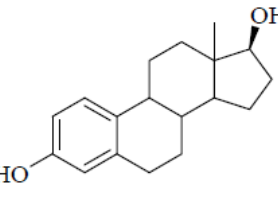
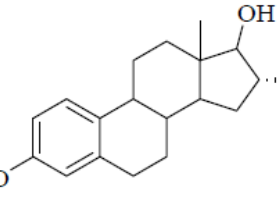
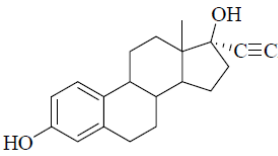
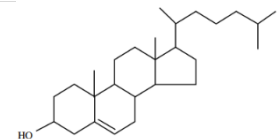
Dentro del conjunto de contaminantes emergentes aparecen los CDE que están constituidos por diversos compuestos de origen natural y químicos, los cuales se introducen al ciclo del agua por medio de los excrementos humanos y los efluentes de la cría de animales. Se ha demostrado mediante investigaciones que los CDE son compuestos capaces de interferir en el funcionamiento de los procesos hormonales del sistema endócrino (Estrada *et al.*, 2012).

Dentro de los CDE que más ha atraído la atención de los investigadores, se encuentran dos familias estrogénicas, la estrona (E1) y los derivados del estradiol 17 β -estradiol (E2), estriol (E3) y 17 α -etinilestradiol (EE2), producidos naturalmente por machos y hembras humanas y de otras especies animales, pero que suministrados en exceso vía farmacológica son sustancias anticonceptivas. Cabe destacar que los CDE son compuestos que sufren una degradación muy lenta cuando son liberados al medio ambiente, por tal razón estos compuestos tienden a acumularse en el ciclo de la cadena trófica, debido a que son poco solubles en agua, pero muy solubles en lípidos

(Morejón, Pérez, Luna & Fonseca, 2005). La tabla 1, resume la estructura molecular de los principales CDE hormonales utilizados en medicamentos anticonceptivos y los compara con respecto al colesterol, para inferir la similitud química y su solubilidad en este tipo de lípido.

Tabla 1.

Estructura molecular de los principales CDE hormonales.

CDE	Estructura Molecular
Estrona (E1)	
17b Estradiol (E2)	
Estril (E3)	
17a-Etinilestradiol (Ee2)	
Colesterol	

Fuente: Fan, Casey, Hakk & Larsen (2007); Águila, Verdecia & Cué (1999); Saavedra, Ramírez, García, Ceballos & Méndez (2012).

3.2 Tratamiento Biológico Convencional de Aguas Residuales

Una de las preocupaciones mayores alrededor de los CDE de naturaleza estrogénica, es su posible baja eliminación en los sistemas convencionales de tratamiento biológico de aguas residuales, lo que hace que los estrógenos puedan regresar al ciclo natural, a través de su vertimiento final o de los lodos provenientes de estos sistemas (Estrada *et al.*, 2012).

Particularmente, se consideran en esta categoría de sistemas de tratamiento convencional, los denominados procesos de biomasa suspendida, tales como los biorreactores anaerobios del tipo UASB y los de base aerobia, es decir los de la familia de los procesos de lodos activados. Algunos tratamientos extensivos como los sistemas de lagunaje, también hacen parte de esta categoría y en términos generales, estos tipos de procesos son unidades que, integradas a un sistema central o de forma autónoma, pueden proveer al menos un nivel de tratamiento primario del agua residual (Henze, Harremoës, Jansen & Arvin, 2001).

3.3 Riesgos e Impactos por CDE

La primera vez que se habló de «Disruptores Endocrinos» fue en 1991, en este año surgió la necesidad de analizar la disponibilidad y el efecto de los contaminantes químicos en el ambiente, sobre todo la alteración que en ese momento se presentaba con algunas especies animales en el sistema endocrino, al ser expuestos a su presencia o asimilación directa o indirecta.

Desde entonces una de las preocupaciones mayores ha sido el crecimiento de algunas sustancias químicas, de las cuales se desconoce su potencial afectación al sistema endocrino (Soto & Sonnenchein, 2002). Aunque ya en los 50's, se había empezado a investigar sobre el DDT (diclorodifeniltricloroetano) y los PCB (bifenilos políclorados) y las posibles afectaciones que estos productos producían a los seres humanos especialmente en el sistema endocrino, estos fueron catalogados como agentes químicos simuladores de los efectos relacionados con estrógenos (Burlington & Lindeman, 1950). En los 70's se aplica la primera restricción al DDT y los PCB y se observó una disminución en la mortalidad de algunas especies animales, aunque algunos animales que lograron sobrevivir presentaron alteraciones en los diferentes sistemas (Soto & Sonnenchein, 2002). A partir de estos precedentes, la comunidad científica comenzó a involucrarse en los problemas que generan los CDE, tanto a los seres vivos como al medio ambiente en general, pues notaron que estos productos son compuestos que tienen una baja tasa de eliminación en las aguas residuales, lo que los convierte en compuestos complejos, de difícil biodegradación y de difícil estudio en los ecosistemas o en los seres vivos, por efecto de sus muy bajas concentraciones (Chang *et al.* 2009).

El estudio de los CDE dentro de los vertimientos de agua residual es muy complejo, por los efectos generados dentro de la cadena trófica y las afectaciones del desarrollo en los seres humanos hasta ahora desconocidos, como, por ejemplo, reconocer que la exposición a xenohormonas durante la gestación del feto, puede causar efectos irreversibles en el desarrollo del aparato genital masculino y femenino. Así mismo, aunque no existe evidencia irrefutable, si existe evidencia que muestra una relación causa-efecto entre el aumento del nivel de estrógenos en el ciclo del agua y problemáticas tales como la feminización de organismos machos, principalmente peces, anfibios

e incluso humanos, (López *et al.*, 2002; Estrada *et al.*, 2012) y la calidad de agua suministrada para consumo humano tanto doméstico como agroindustrial (Torres, 2012). A la fecha, y conforme al reporte emitido por la Comunidad Europea en el 2007 se enlistan 553 compuestos como posibles candidatos de generar disrupción endocrina en los seres vivos, los cuales están presentes en las aguas residuales municipales. Dentro de esta lista, 21 compuestos pueden generar un potencial estrogénico mayor, en los cuales se encuentran los estrógenos E1, E2 y EE2, de uso habitual en medicamentos para anticoncepción (Estrada *et al.*, 2012).

4. Fuentes de Compuestos Disruptores Endocrinos (Hormonas)

La persistencia de muchos CDE en los sistemas de tratamiento de acueductos y PTARs, hace que estas moléculas se mantengan en el “ciclo antrópico del agua” por tiempos prolongados (ver figura 1), haciendo de esta condición un factor de acumulación de CDE en las aguas superficiales, las aguas subterráneas e incluso en los sistemas de agua potable (Hartmann, Beyer & Harm, 2014).

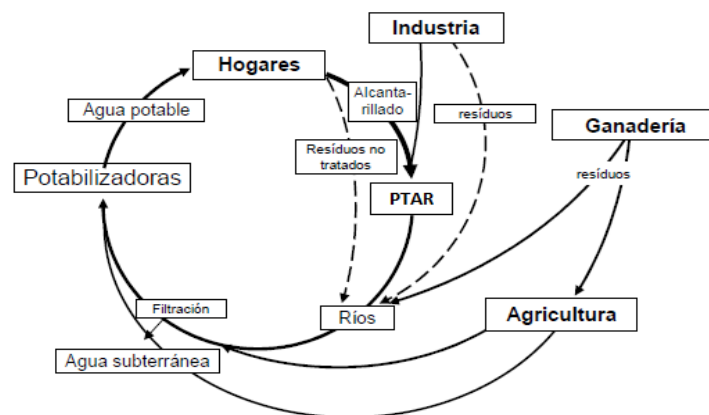


Figura 1. Ciclo antropogénico del agua. Adaptado de: Barceló & López (2008) y modificada para efecto de ilustración de esta investigación.

En efecto, el principal aporte de CDE al ciclo del agua se hace por medio de los efluentes domésticos y también de efluentes industriales, muchas veces conectados a los alcantarillados municipales y estos a su vez ocasionalmente conectados a PTARs (Barrios *et al.*, 2018).

Es importante enfatizar que este aspecto, es decir el de nivel de conexión de los municipios colombianos a PTARs es muy bajo, y por consiguiente el aporte de CDE hormonales a los cuerpos de aguas sin recibir tratamiento, en la práctica es directo y no controlado, pues se estima que menos del 17% de las aguas residuales municipales son tratadas en Colombia y en general predominan sistemas de tipo preliminar o biológicas primarias convencionales de baja eficiencia (Gualteros, 2015), haciendo de esta problemática constituya un factor de riesgo a considerar en el corto y mediano plazo.

4.1 Efluentes Domésticos.

El mayor aporte de CDE (hormonas y otros) a los sistemas de tratamientos de aguas residuales se hace por medio de las excretas humanas, teniendo en cuenta la frecuencia de descarga y la concentración del contaminante en el punto de generación (baños en las viviendas). Los seis grupos de tipos de individuos aportantes de estrógenos en los efluentes domésticos, se refieren en la tabla 1, en relación con los CDE hormonales de mayor incidencia en las excretas (Johson & Sumpter, 2001).

Tabla 2.

Categorización de grupos aportantes de los diferentes tipos de estrógenos, Estrona E1, 17β Estradiol E2 y 17α Estradiol EE2.

Grupo Aportantes	Componente Estrógeno
Hombres	E1-E2
Mujeres en periodo menstrual	E1-E2
Mujeres menopáusicas	E1-E2
Mujeres que toman terapia de reemplazo hormonal.	E1-E2
Mujeres en estado de embarazo	E1-E2
Mujeres que toman píldoras anticonceptivas	EE2

Fuente: Fleming, Achari & Hassan (2016).

La introducción de los estrógenos al ciclo del agua residual urbana, como los que se refieren en la tabla 2, se explica de forma gráfica en la Figura 2., donde es posible observar la ruta metabólica del compuesto EE2, incluyendo sus diferentes medios de metabolización y conjugación en el proceso, antes de llegar al sistema de tratamiento de aguas residuales o PTAR.

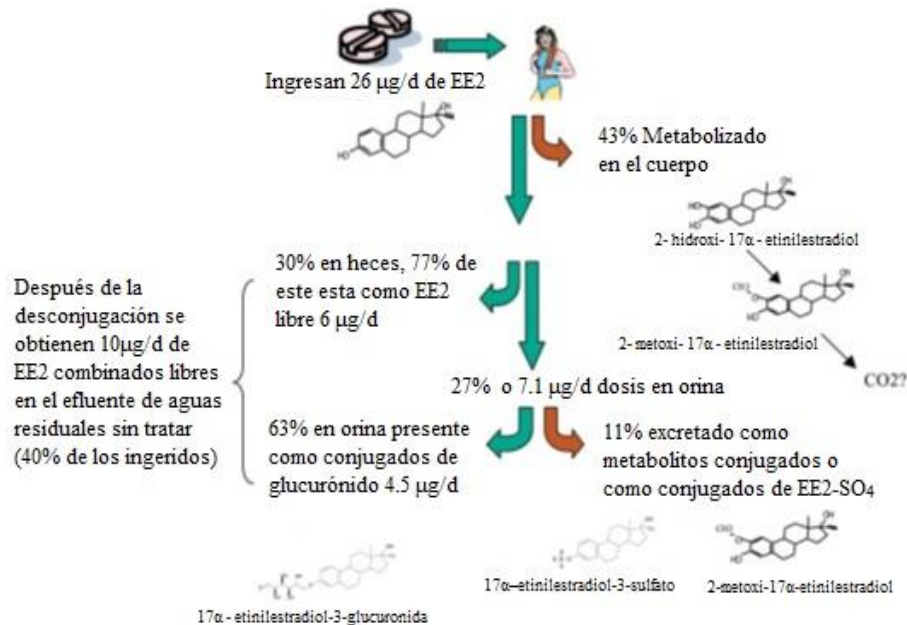


Figura 2. Ruta de metabolización y conjugación del compuesto EE2. Adaptado de: Johnson & Williams (2004), modificada para efecto de ilustración de esta investigación.

Tomando como ejemplo el EE2 y su asimilación en el cuerpo humano, se puede concluir que este compuesto es metabolizado en su gran mayoría y la otra parte se comporta como fracción conjugada. En la figura 2 se hace referencia a la ingesta de 26 μ g/d de EE2, la cual se estima que el 43% es metabolizado en el cuerpo y el 30% es eliminado en las heces, quedando 7.1 μ g/d en la dosis de orina donde el 11% es excretado como metabolitos conjugados y el 63% se encuentra presente en la orina. Al efluente de aguas residuales llegan aproximadamente 10 μ g/d de EE2 combinados libres lo cual indica que, durante la ruta de ingesta, excreción y eliminación de este compuesto 16 μ g/d es convertido en otro compuesto o se elimina con gran facilidad en el proceso de alcantarillado.

4.2 Efluentes Industriales

Para efectos de este trabajo se hace énfasis en las aguas industriales resultantes de actividad agrícola y farmacéutica, principalmente porque en este sector las hormonas son utilizadas en el engorde de animales y en medicamentos utilizados como dispositivos de control de fertilidad o anticonceptivos, en hembras de distintas especies (Gaulke *et al.*, 2009; Derby, Hakk, Casey & Desutter, 2011) aunque no se debe olvidar que los CDE también incluyen algunos plaguicidas y fitoquímicos, además de otros productos químicos industriales y cosméticos (Barrios *et al.*, 2018).

Así, por ejemplo, la industria porcina es una de las más importantes a nivel nacional con un creciente aumento en los últimos años, por tanto, los productores se han visto en la necesidad de incorporar una serie de tecnologías para que haya una mayor eficiencia al momento de mantener la producción. En la producción de los cerdos se generan desechos formados por el estiércol de

los animales y los alimentos sobrantes, las aguas sobrantes de los bebederos, los productos producidos en el lavado de los corrales (Hongn & Vottero, 2017), ocasionando un problema ambiental no solo por los volúmenes de residuos generados, sino también por los vertimientos directos que se hacen a los cuerpos de agua sin previo tratamiento. De esta manera, es altamente probable que estas aguas residuales, contengan hormonas y productos de uso farmacológico como principales CDE, que son reintegrados al ciclo del agua, donde producen distintos niveles de afectación ambiental y en la cadena trófica, como se ha mencionado anteriormente (Gaulke *et al.*, 2009; Ye, Deng, Lou, Ye & Chen, 2018).

En este orden de ideas, es importante señalar que hay una cierta diferenciación sobre el impacto de CDE en vertimientos directos y vertimientos tratados, tanto domésticos como industriales como se muestra a continuación:

4.3 CDE Hormonales en vertimientos directos

En este caso se supone que las hormonas pasan con la estructura molecular original al cuerpo de agua receptor, estimulando el crecimiento espontáneo de algunos microorganismos, como es el caso de las bacterias que al parecer se encargan de mineralizar y bajar los niveles estrogénicos de estas descargas (Koh *et al.*, 2008). Los estrógenos arrojados al medio ambiente sin previo tratamiento representan un riesgo ambiental significativo, porque estos pueden transformarse, renovarse, introducirse y persistir en los ecosistemas, además, pueden ser acumulables y tóxicos para todos los seres vivos, reportándose tendencias a incrementar el riesgo de cáncer de mama y uterino en las mujeres y cáncer testicular en los hombres (Ramírez *et al.*, 2015).

Otros tipos de vertimiento directo, se presentan principalmente en el sector agrícola donde los estiércoles, purines y aguas residuales, muchas veces son utilizados como enmienda de suelos y fertilizantes o como agua de irrigación respectivamente. Estas prácticas cuyos impactos por la acumulación de nutrientes y el riesgo de patógenos ha sido relativamente estudiado (Pinos, García, Peña, Rendón, González & Tristán, 2012) hasta ahora comienzan a ser evaluadas más cuidadosamente, desde la perspectiva de la liberación de CDE al medio ambiente (Derby *et al.*, 2011).

En este sentido, recientemente se han documentado alteraciones hepáticas en una especie de lagartija (*Podarcis sicula*) en Italia, como resultado de contaminación por estrógenos, asociada al uso directo de estiércol como fertilizante en granjas orgánicas. Un hallazgo que puede ser indicativo de bio-acumulación de estrógenos en la cadena alimenticia y un riesgo potencial incluso para los humanos (Verderame, Limatola & Scudiero, 2016). Otro estudio, ha tratado de entender las condiciones que aumentan la biodisponibilidad de EE2 en suelos y en plantas de trigo fertilizados con biosólidos contaminados con este CDE, encontrando que mayores contenidos de materia orgánica y bajos pH del suelo (5.9) regulan la adsorción de este sustrato y el paso a las raíces y son formas de control del paso de EE2 hacia los alimentos (Cantarero, Richter, Brown, Ascar & Ahumada, 2017).

4.4 CDE hormonales en vertimientos tratados

Como se ha expuesto a lo largo del presente documento, existe incertidumbre sobre la verdadera efectividad de los tratamientos de aguas residuales convencionales en la remoción de CDE de

distinto tipo y hormonales en particular, debido a que se han encontrado estrógenos en las fuentes de aguas superficiales y tratadas, lo cual indica que los CDE que llegan a las PTARs posiblemente no reciben tratamiento, debido a esto se cree que estos sistemas no están diseñados para hacer remoción de estas sustancias molecularmente complejas y estables, por lo tanto, estos compuestos y sus metabolitos y reingresan al medio acuático conservando su toxicidad y potencial de afectación biológica (Tejada, Quiñonez, & Peña, 2014).

Sin embargo, se conocen algunos reportes que indican como ciertas tecnologías de tratamiento biológico de aguas, del tipo biomasa suspendida, como los lodos activados y algunos sistemas de crecimiento de biomasa fija, como los biodiscos y los, filtros percoladores, parecen ser eficaces para eliminar los estrógenos de la fase disuelta, removiendo hasta un 90% (Weber, Leuschner, Kämpfer, Dott & Hollender, 2005; Cicek, Londry, Oleszkiewicz & Wong, 2007). En el mismo sentido un estudio sobre la presencia y tratamiento de CDE en aguas residuales en la ciudad de México, sugiere el uso de biorreactores de membranas sumergidas, como estrategia para remoción de los tres principales CDE derivados de anticonceptivos: Estrona (E1), Estradiol (E2) y 17 α -etinilestradiol (EE2) (Estrada *et al.*, 2012).

También existen estudios sobre remoción de otros tipos de CDE en PTARs biológicas, como es el caso de los denominados bloqueadores β (Acebutolol y Nadolol) utilizados en productos de protección de la piel de la radiación solar, encontrándose que éstos muestran tasas de eliminación medias (~ 80%), mientras que el Sotalol y Propanol apenas son afectados por los tratamientos biológicos (tasa de eliminación por debajo del 20%). Por el contrario, sistemas de tratamiento

terciario, como la ozonización, la osmosis inversa o la filtración con carbón activado muestran alta efectividad en la remoción de β -bloqueadores (Gabet, Miège, Choubert, Ruel & Coquery, 2010).

En general, un estudio de revisión sobre el origen y la ocurrencia de estos contaminantes en el medio ambiente, indica que estos a su paso por los sistemas de tratamiento biológico, tanto anaeróbicos como aeróbicos utilizados en la mayoría de PTAR municipales en el mundo, en caso de ser removidos, lo hacen por la vía de la adsorción de estos compuestos o sus metabolitos en los lodos de purga (Hamid & Eskicioglu, 2012), aspecto que será ampliado en las secciones subsiguientes.

Menos común es el uso de aguas municipales tratadas o pre-tratadas en irrigación, pero se cuentan con algunos casos que documentan el impacto por CDE hormonales debido a esta (Stumpe & Marschner, 2007; Shargil, Gerstl, Fine, Nitsan & Kurtzman, 2015). Algunas observaciones, tales como la más difícil mineralización de los compuestos de la familia del estradiol en los suelos, parecen tener explicación en la necesidad de actividad co-metabólica y una mayor interferencia de la adsorción en el suelo, que se ve aún más disminuida cuando los suelos han sido prolongadamente irrigados con aguas residuales, incluso tratadas (Stumpe & Marschner, 2010). Así mismo, parece que la fertilización con biosólidos o lodos de PTAR resulta menos influyente que la irrigación con agua residual, en los niveles de hormonas detectados en cultivos de lechuga, al parecer por la más fácil disponibilidad de la hormona, que tiende a quedar atrapada en los lodos y no se transporta tan fácilmente en el suelo como si lo hace al estar disuelta en agua (Shargil *et al.*, 2015).

5. Eficiencia de Remoción de CDE Hormonales en Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Convencionales

Como se ha mencionado, una de las preocupaciones mayores alrededor de los CDE de naturaleza estrogénica, es su posible baja eliminación en los sistemas de tratamiento biológicos de aguas residuales, lo que hace que los estrógenos puedan regresar al ciclo natural del agua a través de los vertimientos de aguas y lodos provenientes de estos sistemas (Rubio, Chica & Peñuela, 2013).

Los sistemas de saneamiento básico Municipal en Colombia son predominantemente de base biológica y están representados en tres tipos principales, distribuidos de la siguiente manera: Lodos Activados con (40%), Lagunas de Estabilización (30%) y UASB (20%), con base en la cantidad de agua tratada - (Noyola *et al.*, 2012)(Chernicharo *et al.*, 2015). Por esta razón, la presente sección hace una revisión de estudios de caso reportados sobre la eficiencia de estos tipos de sistemas de tratamiento, en la remoción de CDE hormonales, no necesariamente en nuestro contexto, debido a que se trata de un tema incipiente en nuestro medio, pero tomando datos de aplicaciones de estos sistemas en otros países, donde el estudio de esta problemática se encuentra en un mayor estado de avance (Sperling, 2008).

Este aspecto se aborda desde tres perspectivas: la primera desde la actividad metabólica de los microorganismos utilizados en el proceso y su efectividad para remover este tipo de contaminantes (Oller, Malato y Sánchez, 2011), la segunda relativa a las vías de eliminación de estos compuestos, los cuales pueden ser particionados de manera preferente según el tipo de tratamiento en el efluente

final o en los lodos de purga y la tercera, es relativa a las limitaciones de las técnicas analíticas disponibles en la actualidad para detectar y cuantificar estos compuestos, lo que dificulta establecer la verdadera eficiencia de los sistemas de tratamiento disponibles en la remoción de estos contaminantes (Tejada *et al.*, 2014).

5.1 Lodos Activados

Los sistemas aerobios o de lodos activados, son por demás la tecnología más aplicada no solo en Colombia, sino en todo el mundo y en ellos se estima que se logra una biodegradación de estrógenos naturales y sintéticos del orden de 10 a 90%, mientras que el resto parece ser removido por la adsorción de los compuestos en el lodo (Estrada *et al.*, 2012; Weber *et al.*, 2005).

Los lodos activados tienen la connotación de convertir los compuestos orgánicos que entran al sistema en biomasa de una forma rápida, aunque en ocasiones solo sean capaces de remover una pequeña parte de estos. Por otro lado, este tipo de sistemas ha sido estudiado en su eficiencia para la eliminación de fármacos de uso popular, como el ibuprofeno y el diclofenaco los cuales buscan hacer una transformación en especies iónicas, lo cual no garantiza que estos sean eliminados, pues al parecer para que estos fármacos sean eliminados, se hace necesario someterlos a condiciones ácidas en las cuales la biodegradación biológica podría ser menos efectiva (Rubio *et al.*, 2013).

En un estudio sobre el modelamiento de cargas y destino de estrógenos en PTARs, se hace una comparación de la efectividad los diferentes procesos utilizados en la eliminación de los principales estrógenos E1, E2 y EE2. Aquí se establece que en el biorreactor de lodos activados es

donde se hace la mayor remoción de estas sustancias. E1 (91%), E2 (76%), E1+E2 (89%) y EE2 (51%), lo que, en comparación con otros tipos de tratamiento, sería lo más efectivo (Fleming *et al.*, 2016).

Tabla 3.

Eficiencia de tratamientos de lodos activados y relacionados en la remoción de estrógenos.

Compuestos	Tipo de Tratamiento	Valor Detectado Entrada (µg/L)	Valor Detectado Salida (µg/L)	Remoción Porcentaje	Ubicación	Véase Lista de Referencia
E2, E1,EE2	Lodos Activados			85%,74 NA ^a	Europa	Johnson & Williams (2004)
E2, E1,EE2	Lodos Activados			87%,62%85%	Italia	Johnson & Williams (2004)
E2, E3	Biorreactor De Membrana. Nitrificación-Disnitrificación			67%,NA ^a ,NA ^a	Japon	Johnson & Williams (2004)
E1, E2 E1+E2 EE2	Lodos Activado	E1=0.06 E2=0.02 EE2=0.02	E1=0.008 E2=0.004 EE2=0.007	91%, 76%, 89% 51%	Canadá	(Fleming <i>et al.</i> , 2016)

^aNA, no analizado

En la tabla 2, se hace una comparación de los diferentes tratamientos para la remoción de CDE hormonales y se concluye que los lodos activados y algunas de sus variantes, especialmente las que logran nivel de tratamiento secundario o remoción de nitrógeno por nitrificación-desnitrificación muestran efectividad alta en cuanto a la degradación y conjugación de los compuestos de tipo estrogénicos E1, E2, y EE2 dando como resultado porcentajes de remoción por encima del 90%.

5.2 Reactor Anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos (UASB).

El denominado reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed), es un tratamiento primario y un método simple que tiene como objetivo la remoción de la materia orgánica y microorganismos patógenos contaminantes del agua (Chernicharo *et al.*, 2015). Los UASB fueron hasta comienzos de siglo la tecnología de saneamiento urbano pionera en Colombia y actualmente, son la segunda más utilizada para t después de los lodos activados. Existe evidencia que indica que el compuesto 17 β -estradiol (E2) es removido dentro de este proceso donde intervienen también un consorcio bacteriano que se encuentra dentro del reactor. El porcentaje de eliminación del E2 alcanza un 100% solo cuando es combinado con un post-tratamiento de oxidación avanzada (fenton químico y/o electrofenton), pero este es un sistema aún en proceso de investigación (Ruiz, 2014).

5.3 Lagunas Facultativas

Este tratamiento ha sido muy acogido en Colombia por ser una tecnología de baja complejidad y mantenimiento, de operación simple que lo hacen económicamente asequibles para nuestro medio. Entre los principales inconvenientes que se presentan con las lagunas facultativas, se tiene la generación de olores ofensivos ya que genera rechazo por las comunidades que se encuentran a sus alrededores.

Para el caso de eliminación de estrógenos, en el medio colombiano solo se tienen reportes de las bacterias que actúan dentro del proceso en la zona facultativa, donde parece que la conjugación

del E1, se hace por la transformación en otros compuestos, especialmente el E2 (Restrepo, Fuentes, Ruíz & Aguirre, 2013).

Sin embargo, el estudio más completo sobre remoción de E2, en lagunas facultativas con tendencia anaerobia, fue realizado mediante experimentos controlados de tratamiento de efluentes de porcicultura, seguidos con la ayuda de trazadores isotópicos. Estos experimentos mostraron remociones de hasta 78%, valor en el que la remoción permaneció estable a partir de 5 días de tiempo de residencia. Igualmente, fue comprobada la ruta de degradación de E2 pasando a E1 (estrona), molécula que al parecer permanece preferiblemente adsorbida a la biomasa (lodo), (Hakk, Sikora, Casey & Larsen, 2014).

5.4 Otras tendencias tecnológicas en tratamiento biológico de efluentes

Una tendencia en Latinoamérica y en Colombia es la combinación de procesos de lodos activados y anaerobios (PTAR combinadas), sin embargo, es posible que una PTAR anaerobia produzca lodos primarios anaerobios, pero el principal excedente es lodo activado que se purga desde el clarificador secundario (Meneses, Vargas, Grosso, Deeb & Wergara, 2011).

No obstante, no existe información suficiente sobre la persistencia de CDE, particularmente de tipo estrogénicos en los lodos de este tipo de instalación y por lo tanto la única información de referencia a este respecto, es la de PTARs utilizando de manera independiente tratamientos primarios (UASB) y tratamiento secundario (Lodos Activados). Este tipo de tratamiento no ha sido

estudiado para la remoción de los estrógenos por lo tanto no se puede juzgar *a priori* su efectividad para la eliminación de los CDE.

La otra gran tendencia en saneamiento municipal en Latinoamérica, especialmente para pequeñas comunidades, es el uso de humedales (Chernicharo *et al.*, 2015) (Noyola *et al.*, 2012), solos o combinados con procesos fisicoquímicos y microbiológicos lo que hace que estos sean muy efectivos. Un estudio reciente en México indica que los humedales horizontales de flujo sub-superficial remueven hasta un 95% de la DBO₅. dentro de esta carga orgánica removida hay aportes provenientes de la remoción de ciertas familias de CDE, en particular los fármacos (diclofenaco y paracetamol), que muestran una carga elevada a la entrada del humedal y en la salida se observa que ya no hay presencia de estos compuestos (Herrera, Navarro & Torres, 2016).

Una observación muy importante, que sirve de cierre de esta sección, es que algunos de los grupos de bacterias identificadas en vertimientos no tratados luego de su incorporación al cuerpo de agua receptor, coinciden con los hallados en sistemas de lodos activados, indicando que éstos requieren al menos de manera parcial oxígeno molecular para mediar la transformación de los CDE hormonales y que por consiguiente los sistemas de la familia de lodos activados seguramente sean más eficientes en la remoción de estos contaminantes, que los sistemas de base anaerobia como los UASB y las lagunas facultativas. Así mismo, entre los sistemas de lodos activados, aquellos de tipo secundario, es decir donde ocurre la nitrificación-desnitrificación muestran mayor efectividad, indicando que ciertos grupos de bacterias heterotróficas capaces de trabajar en régimen oxico-anóxico y grupos de la familia de las nitrosomas, inciden favorablemente en la degradación de este grupo de CDE.

6. CDE Hormonales en Lodos de Purga de Ptar Municipales

Como se ha descrito a través del presente documento, algunos contaminantes emergentes entre ellos los CDE de tipo hormonal, pueden ser removidos parcialmente en los sistemas de tratamiento de aguas, siendo algunos de ellos particularmente recalcitrantes como es el caso del EE2 en el grupo de las hormonas. Esta remoción puede darse por procesos de degradación, transformación biológica, volatilización y adsorción sobre las partículas de lodo o biomasa que finalmente salen en la purga del sistema, de tal forma que esta vía, es decir la de disposición de los lodos en suelos como enmienda o fertilizante, es una de las formas más frecuentes de retorno de estas sustancias al medio ambiente, donde pueden generar eventos de ecotoxicidad en función del tipo de interacciones que se produzcan con el suelo y el agua de escorrentía, en función de las propiedades fisicoquímicas tanto del receptor como de los substratos (Stumpe & Marschner, 2010; Ying & Kookana, 2005; Lorenzen, Burnison, Servos & Topp, 2006).

En efecto, los lodos son el subproducto de mayor cantidad generado en el proceso de tratamiento del agua residual municipal por vía aerobia (aprox. 30 a 60 kg de VSS por cada 90 kg de DQO removidos), mientras que en PTARs de base anaerobia representan la segunda vía de remoción de DQO después del biogás (Henze *et al.*, 2001).

Los lodos de purga de estos sistemas pueden ser utilizados entre otros para producir biogás adicional o como biocombustible directo para generación de energía eléctrica. Otra opción importante para la gestión final del lodo, es su estabilización biológica para que puedan ser

utilizados como abono de uso agrícola, aportando nutrientes al suelo y mejorando así las características esenciales para garantizar el crecimiento vegetal. Esto hace que los lodos pueden considerarse como sustitutos de fertilizantes químicos. En síntesis, los lodos producidos en las plantas de tratamiento, deben ser aprovechados para garantizar que estos no sólo sean un problema para la población y el medio ambiente, sino que sean de gran ayuda para las soluciones de los problemas que se presentan en la actualidad con los CDE (Limón, 2013).

Cuando las PTAR no pueden proveer una adecuada remoción de estos compuestos contaminantes, las descargas de los CDE pueden alterar el metabolismo de los organismos que interactúan con ellos. Incluso en algunos tratamientos como los de tipo lodos activados, donde algunos trabajos muestran que los CDE pueden llegar a ser ocasionalmente biodegradados y en otros casos adsorbidos en el lodo, existe la preocupación acerca de la correcta disposición de este residuo, en los suelos donde los CDE pueden mantener su actividad bioquímica (Estrada *et al.*, 2012).

Bajo estas consideraciones, es muy probable que la mayor parte de la información referente a la presencia de CDE hormonales en lodos de PTAR, haga referencia a las purgas de sistemas de lodos activados. Así mismo, lo más importante a la fecha es el recaudo de evidencia comprobatoria de que estos compuestos o sus metabolitos son evacuados en buena parte en los lodos de purga, siendo absorbidos en ellos, aprovechando la hidrofobicidad de estas moléculas que las hacen químicamente más afines al material celular de los lodos que al agua (Stevens, Drewes, Khan, McDonald & Dickenson, 2011; Bittencourt *et al.*, 2016; Belhaj *et al.*, 2016).

Aunque desde el punto de vista de la biodisponibilidad para asimilación en plantas, los compuestos estrogénicos evacuados en el efluente parecen tener un mayor riesgo (Shargil *et al.*, 2015), desde la perspectiva del riesgo eco-toxicológico general, la concentración de hormonas normalizada a EE2, detectada en lodos de purga de sistemas de lodos activados (11 a 800 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de lodos seco) es significativamente mayor que la presente en el efluente tratado (0.06 a 0.993 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de agua vertida), haciendo que los coeficientes de riesgo eco-toxicológico sean comparables (9 a 15 para lodo vs. 5 a 18 para efluente). Sin embargo, este indicador de riesgo baja sensitivamente, hasta valores entre 1 y 1.5, cuando el lodo se dispone habiendo mínimamente recibido tratamiento de deshidratación (Belhaj *et al.* 2016).

Así mismo, la efectiva disponibilidad de evacuación o liberación de los CDE hormonales hacia el medio ambiente, en este caso suelos receptores, depende de múltiples factores que se presentan de manera simultánea, entre ellos los ya citados previamente, la hidrofobicidad y la concentración aunque de manera más específica se ha encontrado que la presencia de ciertos tipos de carbono orgánico, en lodos de PTAR o estiércoles utilizados como abonos, puede disminuir la afinidad y por consiguiente la adsorción de estos CDE en los suelos (Stumpe & Marschner, 2010), lo mismo que la estructura y el pH de la matriz de suelo que recibe la aplicación de estas enmiendas (Stumpe & Marschner, 2007; Shargil *et al.*, 2015).

Finalmente, hay que señalar que de manera similar a como existen desafíos técnicos en la detección y cuantificación de CDE hormonales en efluentes líquidos, también existen problemas afines incluso más complejos, debido a la complejidad de las matrices sólidas o semisólidas (lodos, suelos) en la aplicación de técnicas analíticas para analizar este tipo de compuestos en estos

medios. Entre las principales dificultades o retos se encuentran la extracción de los contaminantes retenidos en el lodo, por lo cual se ha tratado de implementar varios métodos (extracción ultrasónica, la extracción con fluido supercrítico, la extracción asistida por microondas y la extracción con líquido presurizado) con el fin de garantizar la eliminación y la reducción de los contaminantes y la alta cantidad de biomasa acumulada (Lindholm, Ahkola & Knuutinen, 2016).

7. Conclusiones y Discusiones

Los principales efluentes aportantes de CDE de base hormonal o estrogénica al ciclo antrópico del agua, son los efluentes domésticos y algunos efluentes industriales, en especial los provenientes de la crianza de cerdos y otros animales a gran escala, que evacuan estas sustancias en su estiércol, orina o en el abono que de ellos se puede fabricar.

Entre las tecnologías convencionales de tratamiento biológico de efluentes más utilizadas en el país, solo se tienen referencias de cierto grado de efectividad con respecto a los lodos activados, a partir de estudios realizados en otros contextos. Se estima que estos pueden remover hasta 90% del E2, en especial en lodos activados de tipo secundario donde se realiza nitrificación-desnitrificación. Por el contrario, existe una gran incertidumbre acerca de la efectividad de tratamientos anaerobios (i.e. UASB) y las lagunas facultativas, ya que no existen suficientes investigaciones sobre la remoción de los este tipo de CDE en estos procesos. Así mismo existe evidencia de que la degradación del E2 pasa preferiblemente por su transformación en E1, pero

este último tiende a ser más difícil de degradar y por consiguiente a ser eliminado dentro del sistema de tratamiento de aguas.

De igual manera, se ha comenzado alrededor del mundo a recopilar pruebas del efecto nocivo de aplicar efluentes, estiércoles o abonos en suelos, con remanentes de hormonas, habiéndose constatado que efectivamente estos contaminantes tienen una mayor afinidad por la fase lodo que por la fase líquida, constituyéndose esta en una ruta preferencial de evacuación al final del tratamiento en una PTAR de base biológica. No obstante, las bajas concentraciones en las que estos compuestos son evacuados del sistema, representan una limitante mayor en lo que respecta a la confiabilidad analítica de los sistemas o técnicas aplicados en su detección.

En el contexto colombiano no existe una caracterización completa de la magnitud del problema y se requiere profundizar en la identificación de CDE de base hormonal tanto en los efluentes de ingreso como de salida de las PTAR, incluyendo los lodos de purga, para anticipar potenciales riesgos en la evacuación de los efluentes y en particular en los usos de los lodos como fertilizantes. Así mismo, este propósito debería cubrir un nuevo rango de tecnologías de saneamiento que muestran tendencia a aumentar o expandir su aplicación en nuestro medio, como es el caso de las denominadas PTAR combinadas y los humedales.

Referencias Bibliográficas

- Águila, B., Verdecia, F. & Cué, M. (1999). Estriol y sus derivados: Comportamiento de la tecnología en el mundo. *Revista Cubana de Farmacia*, 33(3), 195-200.
- Andersen, H., Siegrist, H., Halling, B. & Ternes, T. (2003). Fate of estrogens in a municipal sewage treatment plant. *Environmental science & technology*, 37(18), 4021-4026.
- Barceló, D. & López, M. (2008). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Jornadas de presentación de resultados: el estado ecológico de las masas de agua. Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas*. Fundación Nueva Cultura del Agua Sevilla.
- Barrios, C., De Jesús Rostro, M., Muñoz, B., Iqbal, H., Kannan, S. & Parra, R. (2018). Emergent contaminants: endocrine disruptors and their laccase-assisted degradation—a review. *Science of the Total Environment*, 612, 1516-1531.
- Belhaj, D., Athmouni, K., Jerbi, B., Kallel, M., Ayadi, H. & Zhou, J. (2016). Estrogenic compounds in Tunisian urban sewage treatment plant: occurrence, removal and ecotoxicological impact of sewage discharge and sludge disposal. *Ecotoxicology*, 25(10), 1849-1857.
- Bittencourt, S., Aisse, M., Serrat, B. & Azevedo, J. (2016). Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(1), 43-53.
- Burlington, H., & Lindeman, V. (1950). Effect of DDT on testes and secondary sex characters of white leghorn cockerels. *Proceedings of the society for experimental biology and medicine*, 74(1), 48-51.

- Cantarero, R., Richter, P., Brown, S., Ascar, L., & Ahumada, I. (2017). Effects of applying biosolids to soils on the adsorption and bioavailability of 17 α -ethinylestradiol and triclosan in wheat plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14), 12847-12859.
- Chang, H., Choo, K., Lee, B., & Choi, S. (2009). The methods of identification, analysis, and removal of endocrine disrupting compounds (EDCs) in water. *Journal of hazardous materials*, 172(1), 1-12.
- Chernicharo, C., Van, J., Noyola, A. & Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(4), 649-679.
- Cicek, N., Londry, K., Oleszkiewicz, J. & Wong., D. (2007). Removal of Selected Natural and Synthetic Estrogenic Compounds in a Canadian Full-Scale Municipal Wastewater Treatment Plant. *Water Environment Research* 79(July): 795–800.
- Colombia, Consejo Nacional de Política Económica y Social (2008). Conpes 3530: *lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de residuos sólidos*. Bogotá, D.C.
- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). *Resolución 631 de 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015.
- Derby, N., Hakk, H., Casey, F. & Desutter, T. (2011). Effects of Composting Swine Manure on Nutrients and Estrogens. *Soil Science* 176(2): 91–98.
- Estrada, E., Mijaylova, P., Moeller, G., Mantilla, G., Ramírez, N. & Sánchez, M. (2013). Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de

- México empleando un biorreactor con membranas sumergidas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(2), 275-284.
- Fan, Z., Casey, F., Hakk, H. & Larsen, G. (2007). Persistence and fate of 17 β -estradiol and testosterone in agricultural soils. *Chemosphere*, 67(5), 886-895.
- Fleming, M., Achari, G., & Hassan, Q. (2016). Modeling the loading and fate of estrogens in wastewater treatment plants. *Cogent Environmental Science*, 2(1), 1222690.
- Gabet, V., Miège, C., Choubert, J., Ruel, S. & Coquery, M. (2010). Occurrence and removal of estrogens and beta blockers by various processes in wastewater treatment plants. *Science of the total environment*, 408(19), 4257-4269.
- Gaulke, L., Strand, S. Kalhorn, T. & Stensel, H. (2009). Estrogen biodegradation kinetics and estrogenic activity reduction for two biological wastewater treatment methods. *Environmental science & technology*, 43(18), 7111-7116.
- Gualteros, G. (2015). *Analisis de ciclo de vida comparativo de una muestra de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el departamento de Santander* (tesis maestría). Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Hakk, H., Sikora, L., Casey, F. & Larsen, G. (2014). Fate of 17 β -estradiol in anaerobic lagoon digesters. *Journal of environmental quality*, 43(2), 701-708.
- Hamid, H., & Eskicioglu, C. (2012). Fate of estrogenic hormones in wastewater and sludge treatment: A review of properties and analytical detection techniques in sludge matrix. *Water Research*, 46(18), 5813-5833.
- Hartmann, J., Beyer, R., & Harm, S. (2014). Effective removal of estrogens from drinking water and wastewater by adsorption technology. *Environmental Processes*, 1(1), 87-94.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J., & Arvin, E. (2001). *Wastewater treatment: biological and*

chemical processes. Springer Science & Business Media.

- Herrera, J., Navarro, A. & Torres, E. (2016). Effects of porous media, macrophyte type and hydraulic retention time on the removal of organic load and micropollutants in constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 51(5), 380-388.
- Hongn, P. & Vottero, M. (2017). *Reutilización del agua para la producción sustentable en un establecimiento intensivo porcino* (tesis). Universidad Nacional de Córdoba (RDU), España.
- Johnson, A. & Williams, R. (2004). A model to estimate influent and effluent concentrations of estradiol, estrone, and ethinylestradiol at sewage treatment works. *Environmental science & technology*, 38(13), 3649-3658.
- Johnson, A. C., & Sumpter, J. P. (2001). Removal of endocrine-disrupting chemicals in activated sludge treatment works. *Environmental science & technology*, 35(24), 4697-4703.
- Koh, Y., Chiu, T., Boobis, A., Cartmell, E., Scrimshaw, M. & Lester, J. (2008). Treatment and removal strategies for estrogens from wastewater. *Environmental Technology*, 29(3), 245-267.
- Limón, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?*. Recueperado el 10 de febrero de 2019 de <http://docplayer.es/36628875-Los-lodos-de-las-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-problema-o-recurso.html>
- Lindholm, P., Ahkola, H. & Knuutinen, J. (2017). Procedures of determining organic trace compounds in municipal sewage sludge—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4383-4412.
- López, M., Gil, A., Paz, E. & Barceló, D. (2002). Occurrence and analysis of estrogens and progestogens in river sediments by liquid chromatography-electrospray-mass spectrometry. *Analyst*, 127(10), 1299-1304.

- Lorenzen, A., Burnison, K., Servos, M. & Topp, E. (2006). Persistence of endocrine-disrupting chemicals in agricultural soils. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5(3), 211-219.
- Manickum, T., & John, W. (2014). Occurrence, fate and environmental risk assessment of endocrine disrupting compounds at the wastewater treatment works in Pietermaritzburg (South Africa). *Science of the Total Environment*, 468, 584-597.
- Meneses, A., Vargas, D., Grosso, J., Deeb, A. & Wergara, W. (2011). Biogas availability and its energy use in combined wastewater treatment plants (CWWTP). *Water Practice and Technology*, 6(2).
- Morejón, A., Pérez, C., Luna, B., & Fonseca, M. (2005). Impacto de los disruptores endocrinos en la salud y el medio ambiente. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 36.
- Noyola, A., Padilla, A., Morgan, J, Güereca, L. & Hernández, F. (2012). Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. *Clean–Soil, Air, Water*, 40(9), 926-932.
- Oller, I., Malato, S. & Sánchez, J. (2011). Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination—a review. *Science of the total environment*, 409(20), 4141-4166.
- Pinos, J., García, J., Peña, L., Rendón, J., González, C., & Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 359-370.
- Ramírez, I., Martínez, P., Quiroz, M. & Bandala, E. (2015). Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(5), 31-42.
- Restrepo, G., Fuentes, H. C., Ruíz, R., & Aguirre, N. (2013). Monitoreo del sistema de lagunas de

- estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, Colombia. *Producción+ Limpia*, 7(2).
- Rubio, C., Chica, E. & Peñuela, G. (2013). Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales Para La Eliminación de Contaminantes Orgánicos Emergentes. *Revista Ambiente & Agua*, 8(3), 93-103.
- Ruiz, A. (2014). *Eliminación de Hormonas Persistentes En Aguas Residuales (tesis)*. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. Mexico.
- Saavedra, O., Ramírez, I., García, J., Ceballos, M., & Méndez, E. (2012). Colesterol: Función biológica e implicaciones médicas. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 43(2), 7-22.
- Shargil, D., Gerstl, Z., Fine, P., Nitsan, I., & Kurtzman, D. (2015). Impact of biosolids and wastewater effluent application to agricultural land on steroidal hormone content in lettuce plants. *Science of the Total Environment*, 505, 357-366.
- Soto, A. M., & Sonnenschein, C. (2002). Disruptores endocrinos: una historia muy personal y con múltiples personalidades. *Gaceta Sanitaria*, 16(3), 209-211.
- Sperling, M. (2008). 45 *Choice Reviews Online Basic Principles of Wastewater Treatment*. Recuperado el 10 de febrero de 2019 de <http://choicereviews.org/review/10.5860/CHOICE.45-2632>.
- Stevens, J., Drewes, J., Khan, S., McDonald, J. & Dickenson, E. (2011). Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids. *Water Research*, 45(11), 3417-3426.
- Stevens-Garmon, J., Drewes, J. E., Khan, S. J., McDonald, J. & Dickenson, E. (2011). Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids. *Water Research*, 45(11), 3417-3426.
- Stumpe, B. & Marschner, B. (2007). Long-term sewage sludge application and wastewater irrigation on the mineralization and sorption of 17 β -estradiol and testosterone in soils. *Science*

of the total environment, 374(2-3), 282-291.

- Stumpe, B., & Marschner, B. (2010). Dissolved organic carbon from sewage sludge and manure can affect estrogen sorption and mineralization in soils. *Environmental Pollution*, 158(1), 148-154.
- Tejada, C., Quiñonez, E., & Peña, M. (2014). Contaminantes Emergentes en Aguas: Metabolitos de Fármacos. Una Revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 10(1), 80-101.
- Torres, P. (2012). Perspectives of anaerobic treatment of domestic wastewater in developing countries. *Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)*: 115–29.
- Verderame, M., Limatola, E., & Scudiero, R. (2016). Estrogenic contamination by manure fertilizer in organic farming: a case study with the lizard *Podarcis sicula*. *Ecotoxicology*, 25(1), 105-114.
- Weber, S., Leuschner, P., Kämpfer, P., Dott, W., & Hollender, J. (2005). Degradation of estradiol and ethinyl estradiol by activated sludge and by a defined mixed culture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67(1), 106-112.
- Ye, Z. L., Deng, Y., Lou, Y., Ye, X., & Chen, S. (2018). Occurrence of veterinary antibiotics in struvite recovery from swine wastewater by using a fluidized bed. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(3), 7.
- Ying, G. & Kookana, R. (2005). Sorption and degradation of estrogen-like-endocrine disrupting chemicals in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 24(10), 2640-2645.