

PROPUESTA PARA ENRIQUECER EL PROGRAMA DE LA ASIGNATURA DE INGENIERÍA AMBIENTAL, DE LA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA CON LA INTEGRACIÓN DE ESTUDIOS DE CASO. UN EJEMPLO: APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE ORGANISMOS TOLERANTES A METALES PESADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MIXTAS E INDUSTRIALES

PROPOSAL TO ENRICH THE PROGRAM OF THE COURSE ENVIRONMENTAL ENGINEERING FOR THE B.S. IN CHEMICAL ENGINEERING WITH THE INTEGRATION OF CASE STUDIES. AN EXAMPLE: HOLISTIC USE OF HEAVY METAL TOLERANT ORGANISMS FOR THE TREATMENT OF MIXED AND INDUSTRIAL WASTEWATERS

Ian Castañeda-Jiménez, ESTUDIANTE

UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química,
correo-e: ian-6@hotmail.com

Dr. en Ing. Leonel Ernesto Amábilis-Sosa, ASESOR DIRECTO

Dra. en Ing. Marisela Bernal-González, ASESORA ESFERA AGUA

M. en C. Rolando Salvador García-Gómez, ASESOR ESFERA SUELO

**M. en A.I. Landy Irene Ramírez-Burgos, ASESORA ESFERA
SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS**

**Profa. M.C.M.E. Beatriz Espinosa-Aquino, ASESORA NORMAS DE
CALIDAD***

**Profa. Dr.-Ing. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, ASESORA
GLOBAL**

UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios de
Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental

Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria

Tels. (+55) 56225300 al 04, correos-e: [<leoamabilis@yahoo.com.mx>](mailto:leoamabilis@yahoo.com.mx),

[<marisela_bernal2000@yahoo.com.mx>](mailto:marisela_bernal2000@yahoo.com.mx), [<rolandoga2000_a@yahoo.com.mx>](mailto:rolandoga2000_a@yahoo.com.mx),

[<landy_irb@yahoo.com.mx>](mailto:landy_irb@yahoo.com.mx), [<mcduran@unam.mx>](mailto:mcduran@unam.mx)

04510 Ciudad de México

*BUAP, Instituto de Ciencias, correo-e: [<beatriz.espinosa@correo.buap.mx>](mailto:beatriz.espinosa@correo.buap.mx)

RESUMEN

La industrialización de la mayoría de los sectores productivos, llevan consigo una serie de beneficios que la sociedad percibe rápidamente; sin embargo, las desventajas se hacen notar más lentamente o intentan ser ocultadas por algunas partes del sector manufacturero. El agua, como sustancia vital, es capaz de disolver muchas sustancias y generar biodisponibilidad de compuestos tóxicos para los organismos vivos. Tomando en cuenta que un número considerable de procesos industriales utilizan como base al

agua para sus operaciones y procesos, muchas veces terminará como desecho de los trenes de operación. Por lo tanto, se dará la generación de aguas residuales industriales que, al mezclarse con el agua residual de los asentamientos humanos, se volverá un efluente líquido mixto. De manera ideal, estos volúmenes de aguas usadas deben ser regresados al ambiente en un estado mejor o al menos igual al que tenían cuando ingresaron a estos procesos. Sin embargo, no sucede así y las masas de agua se ven contaminadas, por lo que en este estudio de caso se aborda un método relativamente novedoso para el tratamiento de aguas residuales mixtas e industriales contaminadas con cromo.

Palabras clave: Programa de la asignatura de Ingeniería Ambiental, carrera de Ingeniería Química, estudio de caso, organismos tolerantes a metales pesados, tratamiento, aguas residuales mixtas e industriales

Abstract

Industrialization creates for the productive sectors benefits that societies quickly perceive. However, disadvantages take longer to be noticed or even sometimes the industrial sectors tend to hide them. Water as a vital substance is capable to dissolve many compounds and to render bio-available toxic forms for living organisms. Taking into account that a considerable number of industrial processes use water as an important item for its operations and processes in many cases water will become a residue and, thus, industrial wastewaters when mixed with sewage from human dwellings will become a mixed liquid effluent. Ideally, these liquid effluents should be returned to the environment in a similar way as when these volumes were taken from its original source or even with a higher quality. Unfortunately, this is not the case and water bodies become polluted. Therefore, in this case study a relatively new method for the treatment of mixed effluents as well as industrial wastewaters contaminated with chromium.

Keywords: Program for the course Environmental Engineering, undergraduate studies in Chemical Engineering, case study, heavy metal tolerant organisms, treatment, mixed and industrial wastewaters

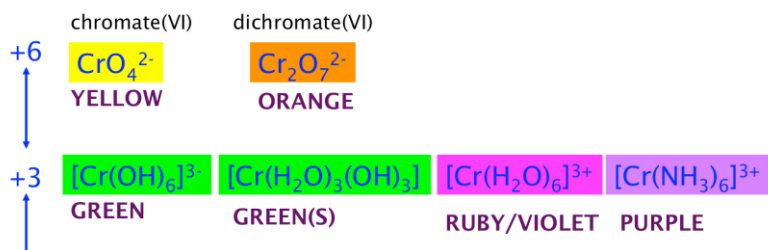
Introducción

La contaminación de agua debido a los desechos que generan diferentes tipos de industrias como las mineras, curtidoras, fabricantes de fertilizantes, generadoras y usuarios de plaguicidas, obliga a los sistemas de tratamiento de aguas residuales a enfrentar el problema de la eliminación de sustancias tóxicas tanto para el ambiente como para la salud humana.

Un caso especial de estos contaminantes tóxicos, es el de los metales pesados, que son elementos de masa atómica entre 63.5 y 200.6 gramos y una densidad relativa mayor a 5 (Srivastava y Majumder, 2008). Los metales pesados en estos días son contaminantes de alta prioridad debido a los problemas ambientales que provocan, por lo que es de extrema importancia la remoción de éstos de las aguas residuales (CEPIS, 2001; Rajaganapathy y col., 2011).

Esta investigación se centra en la eliminación efectiva del cromo de aguas residuales. Este metal existe en dos diferentes estados de oxidación Cr^{III} y Cr^{VI} . En general se ha demostrado que el cromo (VI) es más tóxico que el cromo (III), ya que el primero afecta la fisiología humana, se acumula en la cadena trófica y puede causar problemas de salud desde irritación de la piel hasta carcinoma de pulmón e insuficiencia renal (Khezami y Capart, 2005).

OXIDATION STATES OF CHROMIUM



Estados de oxidación del cromo (Anónimo, redes internacionales: [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015])

Como producto mineral primario, el cromo es explotado en forma de cromita, que es su forma natural más abundante (Volke y col., 2005). Es un metal que se utiliza ampliamente en metalurgia para aportar resistencia a la corrosión y un acabado brillante. El cromo metálico se utiliza para la fabricación de acero, en tanto que sus formas hexavalente y trivalente se usan para cromados, fabricación de pinturas y pigmentos, curtido de pieles, catalizadores y conservador de madera (Álvarez y col., 2004; Stoepler, 1992).



El cromo en la industria de pinturas
[Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015]



El cromo para acabados brillantes y anticorrosivos (Anónimo, redes-i)

Las altas concentraciones de cromo en el ambiente corresponden a su amplio uso en la industria nacional, desde la producción de celulosa y papel, en petroquímica y refinación de petróleo hasta la industria acerera y de fertilizantes (Botello y col., 2005).

Existen varios métodos de tratamiento de metales pesados presentes en las aguas residuales, tradicionalmente el más utilizado es la precipitación química, por su simplicidad y bajo costo, sin embargo, este método solamente es útil para concentraciones altas de iones de metales pesados, sin ser aplicable para concentraciones bajas. Por otra parte, la disposición del lodo residual representa grandes dificultades para su tratamiento y disposición final.

El intercambio iónico a través de resinas también es usado para la eliminación de metales pesados, con la desventaja de su rápida saturación y por ende, requieren una continua regeneración. Además, al término de su vida útil, se genera una contaminación secundaria seria. Por su parte, cabe destacar la técnica de intercambio iónico que a pesar de exhibir buenas eficiencias presenta altos costos económicos, especialmente cuando se tratan grandes cantidades de agua con bajas concentraciones de metales pesados, por lo que su uso a gran escala no es económicamente viable y menos en ciudades pequeñas.

En lo que respecta a las técnicas electroquímicas para el tratamiento de agua, son conocidas como rápidas, bien controladas y destacan por el poco uso de materia química así como la baja producción de lodo residual, pero las tecnologías electroquímicas, requieren una gran cantidad tanto de capital inicial (costos de inversión) como de suministro de energía eléctrica a lo largo de toda su vida útil (costos fijos), lo que a mediano y largo plazo eleva los costos económicos.

Existe un método relativamente nuevo y basado en la biorremediación, específicamente fitorremediación, que se fundamenta en la traslocación del contaminante por parte de la vegetación presente en un humedal artificial. El agua contaminada se pone en contacto con especies vegetales que tienen la capacidad de acumular el metal pesado en sus diferentes órganos como son las partes subterráneas (rizoma y raíces) y, de principal interés, en los órganos aéreos (hojas y tallos).

Los humedales naturales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Los humedales artificiales emulan estas condiciones de los humedales naturales, pero con parámetros de diseño y constructivos como son las relaciones largo/ancho y profundidades inferiores a 90 cm con plantas emergentes. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar. Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales:

1. Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y en la materia orgánica.
2. Utilizar y transformar los elementos por medio del metabolismo de los microorganismos.
3. Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual, dependiendo del funcionamiento hidráulico:

- Sistemas a flujo libre (*FWS*, por sus siglas en inglés) que normalmente se les aplica agua residual pretratada en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente.
- Sistemas de flujo subsuperficial (*SFS*, por sus siglas en inglés) se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten en canales o zanjas excavadas y rellenos de material granular, generalmente grava en donde el nivel de agua se mantiene por debajo del límite superficial.

Estos sistemas a flujo libre o subsuperficiales pueden ser de flujo horizontal o vertical.



Sistema de humedales artificiales prototipo (Anónimo, redes internacionales: [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015])

En cuanto al rendimiento de los humedales, se puede decir que pueden tratar con eficiencia niveles altos de DBO y nitrógeno (rendimientos superiores al 80%), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. En efecto, su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, y rizomas) permite el transporte de oxígeno hacia las zonas profundas, ya que de otra manera sólo se transportaría el oxígeno por difusión a través del agua (Fenoglio-Limón y col., 2001; Guido-Zárata y col., 2008; Reyes-Luz y col., 2011; Soto- Esquivel y col., 2013). Algo importante en los humedales tipo *FWS* es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en materia, que

sirven como sustrato para el crecimiento y desarrollo de la película microbiana que es la responsable de gran parte del tratamiento.

Los organismos autótrofos absorben el cromo a través de sus raíces y entra al cuerpo de la planta causando un desbalance de los nutrimentos, daño a la estructura de la clorofila e inhibe el crecimiento de la planta. En diferentes estudios muestra que la *T. angustifolia* es la planta óptima para la traslocación del cromo debido a su alta acumulación, resistencia al cromo y su gran tasa de crecimiento, también es un candidato potencial para la Traslocación de otros metales como el cobre, plomo, níquel, hierro, manganeso y zinc (Chandra y Yadav, 2010).

Algo importante de mencionar es que los metales pesados son micro-elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, pero en grandes concentraciones son fitotóxicos, es decir, disminuyen el crecimiento de la planta y generan clorosis en especial cuando las concentraciones letales son muy bajas como la del cromo (VI) (Guala y col., 2010).

Por otro lado se ha encontrado que algunos polipéptidos como las fitoquelatinas y metalotioneinas que son sintetizados por la plantas, pueden unirse a los metales para reducir su toxicidad (Estrella-Gómez y col., 2009).

De manera paralela a lo anterior, se han implementado los sistemas de humedales artificiales inoculados con bacterias tolerantes a metales pesados, las cuales también tienen la capacidad de adherir las especies metálicas a su pared celular por fenómenos de adsorción. Esto sugiere que puede existir sinergismo entre el proceso de fitorremediación y bacterias tolerantes, lo cual maximiza las ventajas de remoción de los metales pesados en sistemas de humedales artificiales.

Cabe destacar que la selección del método de tratamiento de agua, depende de la concentración de metal pesado a tratar, de los costos de operación, versatilidad de la planta, sustentabilidad e impacto ambiental (Kurniawan y col., 2006).

Objetivo

Estudiar el aprovechamiento de organismos tolerantes para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con cromo hexavalente en un humedal artificial a escala de laboratorio.

Desarrollo del estudio de caso

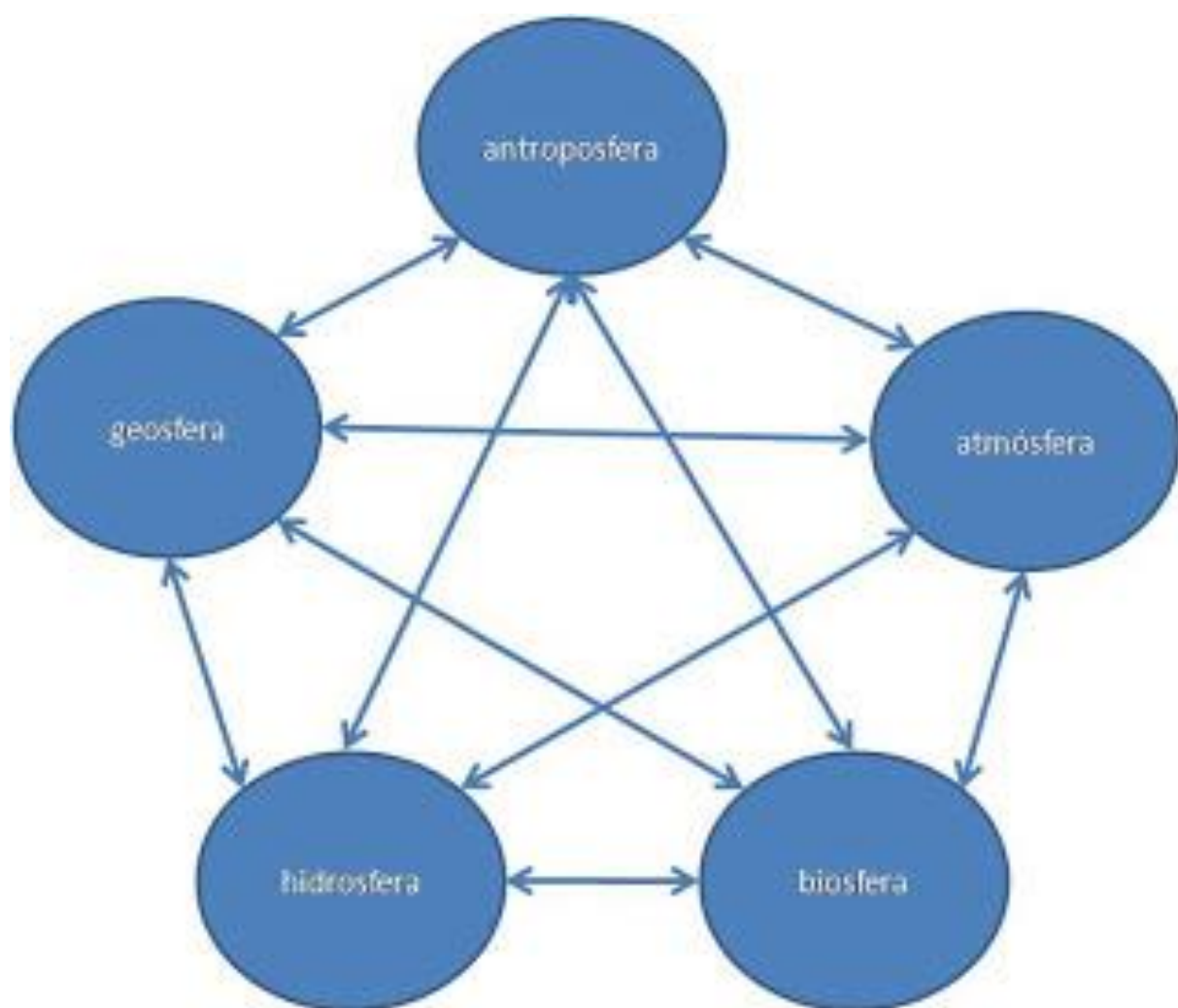
Debido a la extensión del tema y considerando que para cada contaminante puede existir un sinergismo específico entre los componentes de los humedales artificiales que conlleve a una traslocación más eficiente del contaminante, el estudio de caso se centrará en la remoción de cromo hexavalente, el cual es uno de los contaminantes más tóxicos que pueden encontrarse en las aguas residuales mixtas e

industriales, además de su amplio uso en las industrias mexicanas (Instituto de Geografía y Facultad de Química, UNAM, 1985).

La toxicidad del cromo se encuentra en función a su estado de oxidación siendo el catión más tóxico el Cr (VI). Desafortunadamente, es el de mayor uso en la industria por sus propiedades ácidas y oxidantes deseables en la manufactura (Nordberg, 2001).

Se usaron como fuentes de información artículos y tesis que se centraron en la implementación de humedales artificiales para la remoción de este contaminante.

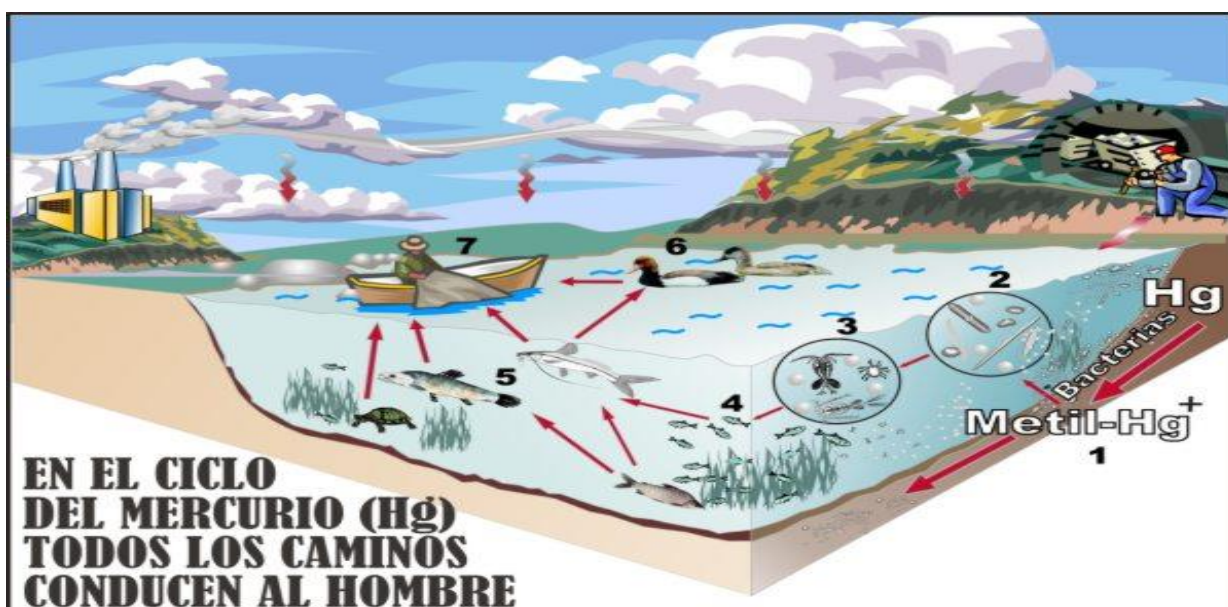
A continuación, de acuerdo con los temas de la asignatura Ingeniería Ambiental, del programa de la licenciatura en Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM, se da su impacto en las esferas ambientales correspondientes.



Esferas en la que se divide nuestra zona humana de influencia para estudiar su contaminación (Nota gramatical: Solamente atmósfera es esdrújula, las demás esferas son palabras graves –no llevan acento ortográfico-) (Manahan, 2007)

Atmósfera

Para el apartado de atmósfera o atmosfera, no hay gran impacto de este método para el caso específico del Cr (VI), ya que los estados de oxidación sólo dan lugar a compuestos solubles, suspendidos o precipitados, todos en el medio acuoso (Domingos y col., 2009). Sin embargo, es importante destacar que el método de humedales artificiales para la remoción de mercurio tiene un problema para la traslocación de este contaminante debido a su naturaleza fisicoquímica, ya que el mercurio ligado a compuestos orgánicos es transferido a las hojas de las plantas acumuladoras y al igual que el mercurio elemental puede tener un cambio de fase al vapor, y por ende ser transferido a la atmósfera (Amábilis-Sosa y col., 2015). Los vapores de mercurio son extremadamente tóxicos para salud, por lo que el uso de un humedal artificial para la remoción de mercurio que no esté confinado, puede resultar contraproducente para las personas que lo operen y el ecosistema en general (García-Mercado y col., 2016).



Problemática del mercurio (Anónimo, redes-i: [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015])

Agua

La contaminación de las aguas superficiales es un problema que puede ocasionar alteración y destrucción del hábitat, efectos nocivos para la salud, eutrofización, disminución de poblaciones de peces y otros recursos (Escobar, 2002).

El agua contaminada con metales pesados generada en diversas operaciones de la industria es descargada de manera directa o indirecta en zonas de circulación natural de agua ya que forman parte de los efluentes de agua residual de sus procesos (Amábilis-Sosa y col., 2013, 2015). Las opciones de remediación de grandes volúmenes de aguas residuales con concentraciones de contaminantes peligrosos como los metales pesados, se vuelven de gran importancia ya que se debe asegurar que el agua disponible en el ambiente esté libre de sustancias dañinas. La contaminación derivada

de la falta de infraestructura y de servicios para el manejo y tratamiento adecuado de estas sustancias inorgánicas ha deteriorado la salud de los acuíferos. Los ecosistemas acuáticos han sido contaminados con una gran cantidad de metales pesados provenientes de diversas actividades de origen antropogénico. La contaminación por metales pesados puede tener efectos devastadores en los organismos presentes en los ecosistemas acuáticos ya que la presencia de éstos afecta la cadena trófica a través de procesos de bioacumulación y bioconcentración, causando así una afectación potencial a la salud y el desbalance del ecosistema (Vinodhini y Narayanan, 2008).

Entre los metales pesados, el cromo representa una de las mayores problemáticas a nivel nacional, ya que 18 estados del país presentan algún tipo de contaminación en sus acuíferos relacionada con este metal, excediendo en la mayoría de los casos los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-002-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2003), que es la que se muestra en la Tabla 1 para el caso del cromo hexavalente. Sin importar lo mencionado en la norma oficial mexicana, hay muchas industrias en todo el país que desechan sus aguas residuales a los efluentes naturales sin un tratamiento y con presencia de contaminantes en altas concentraciones que finalmente terminarán en cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Para tener una idea aproximada de cómo la industria es una de las principales responsables de la presencia de contaminantes, sólo en la región del Río Atoyac, Puebla, México, existen dos empresas de diferente giro que en el punto de descarga final hacia el cuerpo receptor exceden el límite máximo permitido de la NOM-002-SEMARNAT-1996 en lo que al cromo se refiere (Saldaña y Gómez, 2006).

Tabla 1. Límites máximos permisibles de metales pesados ejemplificando el caso de la concentración límite permitida de cromo hexavalente en mg/L (SEMARNAT, 2003)

Parámetros	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1

Algunas de las variables que intervienen en los procesos de remoción de cromo en aguas residuales mixtas son el potencial de hidrógeno, pH, el potencial de oxidación-reducción, pOR, la demanda química de oxígeno, DQO, así como los sólidos suspendidos totales, SST. Sin embargo, se ha demostrado en diversos estudios que la combinación de estas variables sobre la eficiencia de remoción de Cr no tiene una correlación. Lo importante de esto es que dichos parámetros son usualmente empleados para el seguimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Pérez-Coronel, 2013).

En humedales inoculados con bacterias tolerantes sembrados con *Typha latifolia* y *Phragmites australis* se observa adaptación y comportamiento estable en la remoción de cromo. Estos humedales muestran un mejor desempeño que aquellos que cuentan con bacterias convencionales, ya que estas no se estabilizan durante la remoción de cromo.

Lo importante de que un reactor biológico, como se conceptualiza a un humedal artificial desde el punto de vista ingenieril, sea estable, radica en la puesta en marcha y operación de cualquier tipo de tratamiento secundario de las aguas residuales a escala real (Pérez-Coronel, 2013).

Para otras especies de plantas como la *Typha angustifolia*, se encontró que el organismo acumulador, puede sobrevivir a concentraciones de Cr (VI) hasta de 30 mg/L, esta especie tiene una eficiencia de remoción de un rango entre 64 a 87% para soluciones de 9-12 mg/L de Cr (VI), aparte de que la distribución del contaminante se acumula en distintas partes de la planta, el total de proteínas, glúcidos solubles y malonaldehído, incrementaron cuando la concentración del cromo también incrementaba. Los resultados se obtuvieron en observaciones durante 20 días (Chen y col., 2014).



Humedal artificial de flujo horizontal (Anónimo, redes-i: [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015])



Typha angustifolia es la planta óptima para la traslocación del cromo debido a su alta acumulación, resistencia al cromo y su gran tasa de crecimiento (Información tomada de Chen y col., 2014, fotografía: Anónimo, redes-i [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015])

Suelo y subsuelo (Mantos acuíferos)

El material de soporte para los cultivos tolerantes o acumuladores de metales pesados es importante, debido a que afectan directamente la hidráulica del humedal y, por ende, el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por material de diámetro pequeño, se consigue una mayor capacidad de adsorción, por la mayor área expuesta. Por el contrario, si el medio granular es de mayor diámetro, disminuye la eficiencia por reducción del área expuesta, aunque el volumen efectivo es mayor, y no se tienen complicaciones con la carga hidráulica que es otro importante parámetro hidráulico a considerar. El medio granular sirve de soporte para el crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora en forma de biopelícula. El fenómeno de formación de biopelícula consiste en un mecanismo que desarrollan las bacterias en medios de soporte cuando la fuente de carbono es relativamente limitada. Los microorganismos producen un material extracelular para fijarse a los poros del medio de empaque y, una vez que la estructura se encuentra saturada, seguirá un eventual desprendimiento de las bacterias que volverán a estar suspendidas en la columna de agua y al separarlas pudieran ir a los suelos circundantes (Salgado-Bernal y col., 2010, 2012).



Contaminación del suelo por la minería a cielo abierto para la extracción de la cromita
(Fotografía: Anónimo, redes-i [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015])

Es importante mencionar, que un humedal se encuentra limitado por una barrera plástica que lo separa del suelo, sin embargo, en caso de sufrir una avería que permitiera el paso de materia del humedal a sus alrededores, el suelo contaminado, debe tratarse como un residuo peligroso, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007), establece los criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por distintos metales pesados, en lo que a cromo se refiere: Las concentraciones de referencia totales por tipo de uso de suelo, establece que para el cromo hexavalente, se permiten hasta 280 mg/kg en suelo de uso agrícola, residencial o comercial, y 510 mg/kg para uso de suelo industrial.

Para la recolección de muestras presuntamente contaminadas con Cr (VI), no se debe realizar el secado de la muestra, ya que ésta debe conservar la humedad de campo para que la muestra mantenga su estado de oxidación real, al menos que solamente interese en su forma de cromo total. Para la extracción de Cr (VI) en sus formas soluble, adsorbida y precipitada de compuestos en los suelos, se deben usar tres criterios: (1) La solución de extracción debe solubilizar todas las formas de Cr(VI), (2) Las condiciones de extracción no deben de inducir la reducción del Cr(VI) natural a Cr(III), y (3) El método no debe causar la oxidación del Cr(III) natural contenido en la muestra a Cr(VI). Este método reúne estos tres criterios para un amplio rango de matrices sólidas. Bajo las condiciones alcalinas de la extracción se presenta una mínima reducción del Cr(VI) u oxidación del Cr(III) natural (García-Mercado y col., 2015).

Residuos sólidos y sustancias y residuos peligrosos

Los principales residuos de los humedales, son los organismos biológicos que terminan su vida útil dentro del proceso de remoción de contaminante y medio de empaque, estos se consideran peligrosos bajo la NOM-052-SEMARNAT-2005 (SEMARNAT, 2006), que en referencia al cromo tiene las siguientes consideraciones:

- Concentración máxima permitida de cromo 5mg/L
- Lodos de tratamiento de aguas residuales de la producción de pigmentos naranja y amarillo de cromo.
- Residuos que contengan cromo por encima del límite permitido (5 mg/L) con excepción de que todas las sales o soluciones de desecho sean de cromo trivalente y los residuos se manejen durante todo su ciclo de vida en condiciones no oxidantes.

Por otra parte, los residuos biológicos pueden incinerarse, por ejemplo, junto con llantas en hornos tipo Clinker donde inevitablemente se liberarán agentes tóxicos durante la combustión si estos no cuentan con recepción de gases de combustión y su estabilización. La NOM-098-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2004), establece “La incineración de residuos provenientes de cualquier actividad, incluyendo los residuos peligrosos, produce emisiones que provocan la contaminación del ambiente y con ello dañan a los ecosistemas y a la salud humana; lo cual demanda la adopción de acciones preventivas tendientes a propiciar condiciones de operación adecuadas y valores límite de emisión aceptable, en particular en lo que se refiere a dioxinas y furanos. Las acciones preventivas, de conformidad con la política ecológica, requieren de un enfoque en el que se incluyan los diferentes tipos de medios receptores, lo cual implica considerar de manera integral el control de las emisiones al aire y el manejo de las cenizas” (Corona-Cuapio y col., 1999; 2011).

El límite máximo permisible de emisiones para instalaciones de incineración de residuos en lo que a dioxinas y furanos se refiere, es de 0.2 ng/m³ anual para instalaciones de incineración nuevas y para las existentes antes del 2002 de cuando se promulgó la norma es de 0.5 ng/m³ anuales, los cuales deben medirse con cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución. Una vez llevada a cabo la incineración, el cromo hexavalente debe reducirse a cromo trivalente y, una vez en ese estado, puede almacenarse en un sitio de disposición controlada en un medio no oxidativo (Corona y col., 1998, Corona-Cuapio y col., 2011).



Horno Clinker usado en las industrias cementeras

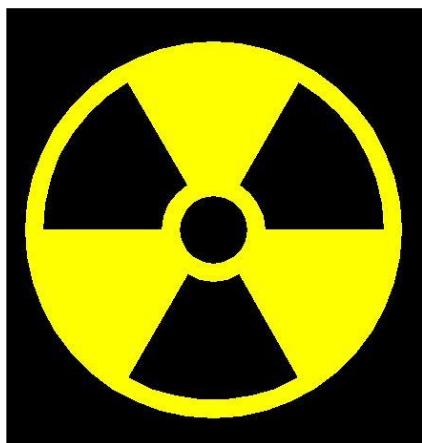


Símbolo internacional para sustancias y residuos peligrosos

Fotografía: Anónimo, redes-i [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015]

Ruido y radiaciones

La contaminación por ruido y radiación, en un humedal es prácticamente nula, debido a que el sistema de artificial tiene mínima presencia de mecanización por ejemplo, en los humedales de flujo libre, la mecanización es nula, a comparación de diferentes métodos secundarios convencionales de tratamiento de agua, en los cuales se hace uso de diademas orejeras contra el ruido. En el peor de los casos para este rubro, se requeriría un sistema de bombeo, el cual también sería mínimo en comparación con los sistemas de tratamiento de agua residual mecanizado. Por su parte, la generación de radiación puede considerarse nula para estos sistemas secundarios de tratamiento de agua, dado que no existen fuentes de propicien su emisión.



Símbolo internacional para el ruido

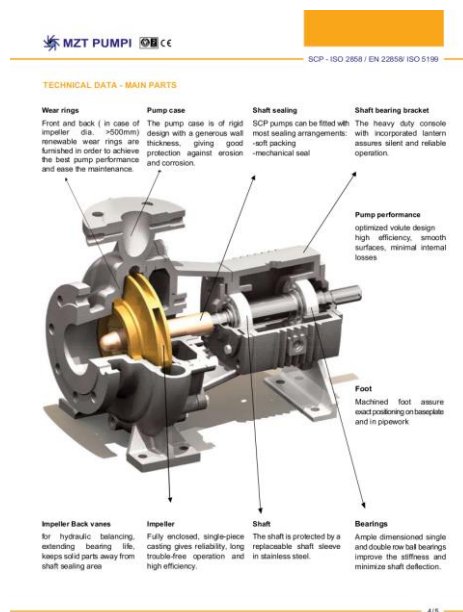


Fotografía: Anónimo, redes internacionales [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015]

Normas de calidad

Durante la implementación de los sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de cromo o para el tratamiento de aguas residuales municipales, se requieren procesos de excavación, manejo de maquinaria, instalación de equipo eléctrico (principalmente bombas) y sistemas hidráulicos de conducción. Para cada uno de estos procesos existen normas en materia de calidad y seguridad e higiene que deben seguirse. Al respecto se mencionan las siguientes:

ISO 14001:2005 que establece los criterios sobre el manejo de sistemas ambientales, especifica el cuadro de trabajo que debe seguirse para establecer un sistema de manejo ambiental efectivo. En lo que se refiere a las bombas hidráulica, se tienen las siguientes normas: ISO 2858:1975 para criterios de dimensiones de bombas centrífugas, ISO5199:2002 para criterios de diseño y especificaciones técnicas para las bombas centrífugas, ISO 3661:1977 para los criterios sobre dimensiones y localizaciones de la placa base. UNE-EN ISO 1452-5:2011 (antes NTP ISO 4422: 2007) para los sistemas de canalización en materiales plásticos para la conducción de agua y saneamiento enterrado.



Ejemplo del diagrama de una bomba que debe cumplir con la norma ISO correspondiente

Estudio de caso: Cromatos de México, en el estado de México, México
(Fotografía: Anónimo, redes-i [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015])

Estudios ambientales

Uno de los estudios ambientales de mayor impacto sobre la Ciudad de México en cuanto a contaminación por cromo se refiere, es la empresa de Cromatos de México, cerrada en 1978. La empresa Cromatos de México se estableció en 1958 en la colonia Lechería, ubicada en el municipio de Tultitlán, Estado de México, para la producción de pigmentos y sustancias para curtir pieles a partir de la cromita (FeCr_2O_4). Durante los 20 años de operación, la planta emitió cromo hexavalente a la biosfera y en sus instalaciones acumuló alrededor de 75 mil toneladas de residuos industriales con Cr (VI). En septiembre de 1978 ante las evidencias de daño que la planta había causado a los habitantes, y como resultado de una movilización de un grupo de vecinos, con apoyo del sector académico y la prensa, la empresa fue clausurada por los servicios coordinados de salud en el Estado de México.

Neri y colaboradores, en su artículo publicado en 1980 por la revista Salud Pública de México, de título “Daños a la salud de los trabajadores de una fábrica de cromatos”, reportan que la perforación del tabique nasal en los obreros era de 46.4% y, en los oficinistas, de 15.8%. No obstante estas cifras tan elevadas, concluyen que: “A pesar de la intensa inhalación de cromatos no se hayan registrado casos de cáncer respiratorio, apoya la afirmación citada al principio de este informe: que la perforación del tabique nasal no se asocia necesariamente con la aparición de cáncer de las vías respiratorias.” (Neri y col., 1980).

En su momento se hicieron varios estudios sobre los efectos del cromo en la población de Lechería y en los trabajadores de Cromatos, pero las conclusiones fueron diferentes. Por ejemplo, en 1977 se inició un estudio epidemiológico para la identificación clínica y subclínica de los posibles efectos del cromo en una muestra representativa de la población (Neri y col., 1982). La investigación clínica consistió en identificar, a través de una encuesta, a quienes presentarían las secuelas propias de la intoxicación por cromo. Por ejemplo, destrucción o perforación del tabique nasal; tumores internasales; conjuntivitis y problemas en la piel. Para la identificación subclínica se hicieron análisis de cromo en pelo y orina a 863 personas de las 7 mil 900 que habitaban en los alrededores de la planta, utilizando como criterio los resultados de la encuesta. Los autores concluyeron que “La absoluta falta de datos sobre el cromismo en la población abierta [...] lleva a una conclusión obvia: los habitantes de Lechería-San Francisco Chilpan nunca estuvieron expuestos a un ambiente contaminado con sales de cromo. Si no hubo exposición, no es sensato continuar diciendo que en los próximos años aparecerán en la población los efectos a largo plazo del cromismo” (Neri y col., 1982).

En el caso de Cromatos de México la principal materia prima era el mineral cromita procedente de Sudáfrica. La producción diaria de la planta citada era de 12 toneladas de cromato de sodio, una tonelada de cromato de potasio y casi ocho toneladas de sulfato de sodio, más dicromatos en cantidades proporcionales al sulfato de sodio (Instituto de Geografía y Facultad de Química, UNAM, 1985). Para procesarlo, el mineral se secaba y se trituraba hasta que las partículas tuvieran un tamaño de 74 micras. Después se mezclaba con carbonato de sodio o cal y esa mezcla se calcinaba en horno rotatorio entre 1100 y 1500°C por cuatro horas. Este proceso generaba emisiones de cromo no sólo por la chimenea del horno, sino también porque el viento transportaba el

polvo fino de los procesos que se efectuaban a cielo abierto, lo que exponía a los trabajadores, a quienes les corroía el tabique nasal y les afectaba piel y pulmones. De modo similar afectaba a los habitantes de las zonas aledañas (Instituto de Geografía y Facultad de Química, UNAM, 1985). Como resultado de este estudio, se propuso una solución que permitiera resolver la presencia de estos residuos potencialmente peligrosos que, incluso, fue premiada en 1991 (Bazúa-Rueda y col., 1991).

A partir del 2001, la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ, por sus siglas en alemán) inició su apoyo técnico y financiero a la Semarnat para trabajar conjuntamente en un plan de remediación. Incluyó las actividades de caracterización y limpieza de los residuos peligrosos. De igual forma, la colaboración con la Comisión Nacional del Agua (Conagua) respecto de las mediciones geofísicas y estudios hidrológicos de los pozos de agua potable y de uso industrial de la zona de influencia. Todo lo anterior como base para un plan de saneamiento del acuífero contaminado (Schmidt y col., 2008).

Conclusiones y perspectivas

Dentro de las especificaciones con las que cuenta un humedal artificial para su correcto funcionamiento, una de las opciones que incrementaría la eficiencia de remoción de contaminantes en dicho humedal, es el uso de roca volcánica como soporte para los organismos biológicos, ya que sus características físico químicas, combinan factores como la porosidad y la permeabilidad que los vuelven un medio teóricamente mejor como base de un humedal (Pérez-González y col., 2015).

Para la introducción de un humedal como método secundario de tratamiento de aguas residuales, debe asegurarse que los modelos piloto, alcancen un estado estable, ya que al inicio de cualquier proceso, el sistema se comportará inestablemente. Únicamente al estabilizarse se podrán obtener datos confiables acerca de las eficiencias de remoción y caracterización del producto final.

El desecho de los organismos ya utilizados que son considerados residuos peligrosos debido a su reactividad y a su toxicidad por la presencia del Cr (IV) en las distintas partes de su biomasa y posterior a su incineración, en vez de reducir el polvo de cromo hexavalente que quede en las cenizas y almacenarlo en forma de Cr (III), se sugiere la venta directa con las empresas productoras de estos metales que podrán recuperarlo muy fácilmente.

También se sugiere buscar otro método menos agresivo con el ambiente para la disposición de los residuos, ya sea la desorción o la recuperación del contaminante de la planta.

Considerando todo lo anterior en conjunto con la información presentada en el presente estudio, se considera factible la implementación de humedales artificiales con presencia de plantas hiperacumuladoras de metales pesados, que en conjunto sinérgico con bacterias tolerantes, incrementen y establezcan la eficiencia de remoción de metales como el cromo que son uno de los problemas ambientales en México y en el mundo. Todo esto con su previa evaluación técnica-económica para llevarlo a escala real.

Reconocimientos

Los reactivos, materiales y otros insumos fueron adquiridos con el apoyo de la UNAM a través del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y el Mejoramiento de la Enseñanza, PAPIIME, “Apoyo a la enseñanza experimental de los laboratorios terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM”, “Apoyo a la enseñanza experimental de las asignaturas terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM” y “Desarrollo de material didáctico para las asignaturas ingeniería ambiental y estancia académica de la carrera de ingeniería química con base en estudios de caso” Claves EN103704, PE101709 y PE-100514, respectivamente, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, DGAPA. Se reconoce también el apoyo parcial del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, PAIP, Clave 50009067 para la parte experimental. Este documento fue presentado en el *Sixth International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues* en noviembre de 2015 y fue parte de una publicación de ese evento (Bernal-González y col., 2015).

Referencias

- Álvarez, S.G., Maldonado, M., Gerth, A., Kuschk, P. 2004. Caracterización de agua residual de curtiduría y estudio del lirio acuático en la recuperación de cromo. *Información Tecnológica* (en línea). ISSN 0718-0764. 15(3):75-80 [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642004000300012
- Amábilis-Sosa, L.E., Jiménez-Guevara, K.V., Ramírez-Burgos, L.I., Siebe-Grabach, C.D., Moeller-Chávez, G.E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2013. Remoción de metales pesados a través de un humedal artificial inoculado con cepas tolerantes. En *Memorias del X Simposio Latinoamericano de Química Analítica Ambiental y Sanitaria*. Pp. 527-536. Puebla, México.
- Amábilis-Sosa, L.E., Siebe, C., Moeller-Chávez, G., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2015. Accumulation and distribution of lead and chromium in laboratory-scale constructed wetlands inoculated with metal-tolerant bacteria. *International Journal of Phytoremediation*. 17(11):1090-1096 (2015) ISSN 1522-6514 (print) 1549-7879 (online).
- Bazúa-Rueda, E.R., Gutiérrez-Ruiz, M.E., Villalobos-Peñaloza, M., González-González, M.L. 1991. Estabilización y fabricación de ladrillos, una alternativa de solución para residuos sólidos peligrosos ricos en cromo hexavalente. En “Premio Nacional Serfín El Medio Ambiente”. Editor José Juan De Olloqui. Pp. 1-78. Pub. Futura Editores. Villa Nicolás Romero, Estado de México, México.
- Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Ramírez-Burgos, L.I., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Castañeda-Jiménez, I., Amábilis-Sosa, L.E. 2015. Manual para enriquecer el programa de la asignatura de Ingeniería Ambiental de la carrera de Ingeniería Química de la FQ-UNAM con la integración de estudios de caso. Un ejemplo / *Manual for enhancing the teaching of the undergraduate course on Environmental Engineering of the Chemical Engineers formation at the UNAM Facultad de Química using case studies. One example* (EA-01). En *Book of selected contributions of the Sixth International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues*. México D.F. Noviembre 11-14. Pp. 217-228. [Fecha de consulta: 3 de

- diciembre de 2015]. Dirección electrónica: <http://www.ambiental.unam.mx/albunimagenes/Libro-e%20-%20e-Book%20ISE%202015.pdf>
- Botello, A.V., Rendón-von-Osten, J., Gold-Bouchot, G., Agraz-Hernández, C. 2005. Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Segunda edición. Universidad Autónoma de Campeche-UNAM-INE. Pp. 332-334. México, D.F. México. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: file:///C:/Users/Carmen%20Dur%C3%A1n/Downloads/GM_contaminaci%C3%B3n.pdf
- CEPIS. 2001. *Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente Organización Panamericana de la Salud División de Salud y Ambiente, Washington, D. C., EE.UU. 24 p.
- Chandra, R., Yadav, S. 2010. Potential of *Typha angustifolia* for phytoremediation of heavy metals from aqueous solution of phenol and melanoidin. *Ecol. Eng.* 36:1277-1284.
- Chen, Y.-L., Hong, X.-Q., He, H., Luo, H.-W., Qian, T.-T., Li, R.-Z., Jiang, H., Yu, H.-Q. 2014. Biosorption of Cr (VI) by *Typha angustifolia*: Mechanism and responses to heavy metal stress. *Bioresource Technology*. 160:89-92.
- Corona, A., Granados, E., López-Andrade, X., Bernal, M., Durán-de-Bazúa, C. 1998. Análisis de gases de salida de un incinerador de residuos hospitalarios en México. Proyecto UNAM-FQ-PIQAYQA/Pro-Therm, S.A. de C.V. *INFORME FINAL DE PROYECTO AIRE-02-98*. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 56 pags. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 20 ejemplares.
- Corona-Cuapio, A., Sánchez-Torres, A., Manahan, S.E., Durán-de-Bazúa, C. 2011. Aire. En *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Cap. 5. II. Ambiente. Ed. Gral. Francisco Bautista-Zúñiga. UNAM, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental e Instituto de Geografía. ISBN 978-607-02-2127-9. México D.F. Segunda edición. Pp. 141-187. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/tmuestreo.pdf
- Corona-Cuapio, A., López-Andrade, X., Bernal-González, M., Durán-de-Bazúa, C. 1999. Auditoría: Protocolo de pruebas preoperativas del sistema de tratamiento de residuos de destilación de anhídrido ftálico F-22. Proyecto UNAM-Orgánicos, S.A. de C.V. *INFORME FINAL DE PROYECTO AIRE-01-99*. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 56 pags. Facultad de Química, UNAM. ISBN 968-36-7539-5. México D.F. 100 ejemplares.
- Domingos, S., Dallas, S., Germain, M., Ho, G. 2009. Heavy metals in constructed wetlands treating industrial wastewater: distribution in the sediment and rhizome tissue. *Water Science and Technology*. 60(6):1425-1432.
- Escobar, J. 2002. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Ed. CEPAL-ECLAC de Naciones Unidas. Pp. 5-6. Santiago de Chile, Chile.
- Estrella-Gómez, N., Mendoza-Cózatl, D., Moreno-Sánchez, R., González-Mendoza, D., Zapata-Pérez, O., Martínez-Hernández, A., Santamaría, J.M. 2009. The Pb-hyperaccumulator aquatic fern *Salvina minima* Baker, responds to Pb²⁺ by increasing phytochelatin synthesis via changes in SmPCS expression and in phytochelatin synthase activity. *Aquat. Toxicol.* 91:320-328.
- Fenoglio-Limón, F.E., Genescá-Llongueras, J., Durán-de-Bazúa, C. 2001. Construcción y evaluación de electrodos de medición de potenciales de óxido-reducción para la evaluación indirecta de las condiciones de aerobiosis en sistemas que simulan humedales artificiales. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. 16(2):61-68 (ISSN 0186-6036).

- García-Mercado, H.D., Fernández-Villagómez, G., Garzón-Zúñiga, M.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2016. Remediation of mercury polluted soils using artificial wetlands. *International Journal of Phytoremediation*. 18(08):1090-1096 (ISSN 1522-6514, print, 1549-7879, online).
- García-Mercado, H.D., Fernández-Villagómez, G., Garzón-Zúñiga, M.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2015. Fitorremediación de mercurio en suelos y su destino ambiental / *Phytoremediation of mercury in soils and its environmental fate* (SyAS-01). En *Book of selected contributions of the Sixth International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues*. México D.F. Noviembre 11-14. Pp. 181-192. [Fecha de consulta: 3 de diciembre de 2015]. Dirección electrónica: <http://www.ambiental.unam.mx/albunimagenes/Libro-e%20-%20e-Book%20ISE%202015.pdf>
- Guala, S. D, Vega F. A. Covelo, E. F., 2010 The dynamics of heavy metals in plant-soil interactions. *Ecol. Model.* 221:1148-1152.
- Guido-Zárate, A., Durán-de-Bazúa, C. 2008. Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio / *Pollutants removal in a lab scale constructed wetlands model system*. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. 23(1):15-22 (ISSN-0186-6036).
- Instituto de Geografía y Facultad de Química, UNAM. 1985. Estudio de monitoreo y evaluación del cementerio industrial de Cromatos de México, S.A., en Tultitlán, Edo. de México, Primera Etapa. Elaborado para Sedue). México, DF. México. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: http://repositorio.inecc.gob.mx/ae/ae_001902.pdf
- ISO 14001. 2005. International Standardization for Organization 14001. Sistemas de gestión ambiental. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:es>
- ISO 2858. 1975. International Standardization for Organization 2858. Criterios de dimensiones de bombas centrífugas. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: <https://www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/ps-10-13-s.pdf>
- ISO 5199. 2002. International Standardization for Organization 5199. Criterios de diseño y especificaciones técnicas para las bombas centrífugas. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: <https://www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/ps-10-31-s.pdf>
- ISO 3661. 1977. International Standardization for Organization 3661. Criterios sobre dimensiones y localizaciones de la placa base. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:3661:ed-1:v1:en>
- Khezami, L., Capart, R. 2005. Removal of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbons: Kinetic and equilibrium studies. *J. Hazard. Mater.* 123:223-231.
- Kurniawan, T.A., Chan, G.Y.S., Lo, W.H., Babel, S. 2006. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chem. Eng. J.* 118:83-98.
- Manahan, S.E. 2007. Introducción a la química ambiental. Coed. UNAM-Editorial Reverté. Barcelona-Ciudad de México, España-México.
- Neri, R., González, A., Quiñones, A. 1980. Daños a la salud de los trabajadores de una fábrica de cromatos. *Salud Pública de México*. XXII:135-141.

- Neri, R., González, A., Quiñones, A. 1982. Posibles daños a la salud de una comunidad abierta, por sales de cromo en el ambiente los trabajadores. IV Investigación en la población de Lechería-San Francisco Chilpan. Salud Pública de México. XXIV:25-32.
- Nordberg, G. 2001. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Ed. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Volumen II. Pp. 63.15-63.18. España.
- Pérez-Coronel, E. 2013. Efecto de bacterias tolerantes sobre la eficiencia de remoción de cromo en humedales artificiales. Tesis profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Química, Universidad La Salle. Defensa: Noviembre 12. México DF. México.
- Pérez-González, R., Amábilis-Sosa, L.E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2015. Adsorción de metales pesados en dos materiales pétreos usados como medios de soporte en humedales artificiales / *Adsorption of heavy metals in two petreous materials used as support media for artificial wetlands* (SyAS-02). En Book of selected contributions of the Sixth International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues. México D.F. Noviembre 11-14. Pp. 193-202. [Fecha de consulta: 3 de diciembre de 2015]. Dirección electrónica: <http://www.ambiental.unam.mx/albunimagenes/Libro-e%20-%20e-Book%20ISE%202015.pdf>.
- Rajaganapathy, V., Xavier, F., Sreekumar, D., Mandal P.K. 2011. Heavy metal contamination in soil, water and fodder and their presence in livestock and products: A review. *J. Environ. Sci. Technol.* 4(3):234-249.
- Reyes-Luz, M.I., Guido-Zárate, A., Durán-de-Bazúa, C. 2011. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio / Phosphorus removal in a lab scale system of artificial wetlands. *Revista Química Central de la Facultad de Ciencias Químicas (Ecuador)*. 2(1):25-32 (ISSN 1390-5562).
- Saldaña, P., Gómez, M.A. 2006. Caracterización de fuentes puntuales de contaminación en el Río Atoyac, México. En XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Ed. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Punta del Este, Uruguay.
- Salgado-Bernal, I., Carballo-Valdés, M.E., Martínez-Sardiñas, A., Cruz-Arias, M., Durán-Domínguez, C. 2012. Interacción de aislados bacterianos rizosféricos con metales de importancia ambiental. *Rev. Tecnol. Ciencias Agua*. 3(3), 83-95.
- Salgado-Bernal, I., Cruz-Arias, M., Carballo-Vélez, M.E., Martínez-Sardiñas, A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2010. Interacción de aislados bacterianos rizosféricos con metales de importancia ambiental: futura aplicación en el tratamiento de aguas / *Rhizospheric isolated bacteria interaction with metals of environmental importance: Future application for wastewater treatment*. Premio a la MEJOR contribución en cartel de la Mesa Redonda de AGUA Y AGUAS RESIDUALES. VI Minisimposium Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Agua, Atmósfera y Suelo. Septiembre 8-11. México D.F. México.
- Schmidt, W., Ruiz Saucedo, U., Swoboda, P. 2008. Emergency measures and long term remediation plan for the chromium (VI) contaminated site Cromatos de México, Tultitlán, México. En Proceedings of the 1st International Conference Hazardous Waste Management, Chania, Greece. October 1-3. P. 155. [Fecha de consulta: 3 de mayo, 2015]. Dirección electrónica: <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=13056>
- SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Información tecnológica (en línea) [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015] dirección electrónica:

- <http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/sedema/leyes-reglamentos/normas/federales/NOM-002-SEMARNAT-1996.pdf>
- SEMARNAT. 2004. Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, que establece la protección ambiental-incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Información Tecnológica (en línea) [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2015] dirección electrónica: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1309/1/nom-098-semarnat-2002.pdf>
- SEMARNAT. 2006. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Información Tecnológica (en línea) [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015] dirección electrónica: http://www.inb.unam.mx/stecnica/nom052_semarnat.pdf
- SEMARNAT. 2007. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Información tecnológica (en línea) [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PP03/DO950.pdf>
- Soto-Esquivel, M.G., Guido-Zárate, A., Guzmán-Aguirre, S., Mejía-Chávez, A.G., García-Gómez, R.S., Huanosta, T., Padrón-López, R.M., Rodríguez-Monroy, J., Mijaylova-Nacheva, P., Buitrón-Méndez, G., Durán-de-Bazúa, C. 2013. Algunos aspectos interesantes de sistemas de humedales a escala de laboratorio y de banco en México. Revista Química Central de la Facultad de Ciencias Químicas (Ecuador). 3(2):53-65 (ISSN 1390-5562).
- Srivastava, N.K., Majumder, C.B. 2008. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. J. Hazard. Mater. 151:1-8.
- Stoeppler, M. 1992. Hazardous metals in the environment. Editorial Elsevier. P.93. Amsterdam, Holanda.
- UNE-EN ISO 1452-5. 2011. Sistemas de canalización en materiales plásticos para la conducción de agua y saneamiento enterrado. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2015]. Dirección electrónica: <http://www.en.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0046882#.V8JIQ9QrKXY>
- Vinodhini, R., Narayanan, M. 2008. Bioaccumulation of heavy metals in organs of fresh water fish *Cyprinus carpio* (common carp). Int. J. Environ. Sci. Tech. 5(2):179-182.
- Volke, T., Velasco, J.A., De la Rosa, D.A. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Pp. 141-143. México D.F. México.