

La mala reglamentación en cuanto a la contaminación del aire emanada por fuentes industriales, energéticas y de transporte a través del mundo, perjudica la salud humana y agrava el calentamiento global. Así también, la contaminación de ríos y mares con aguas servidas o residuales, con escurrimientos agrícolas y con desechos industriales, enferma a personas vulnerables, envenena el agua potable y mata la fauna silvestre.

Las malas prácticas agrícolas producen la erosión del suelo, lo cual reduce la productividad, perjudica la calidad del agua y degrada la tierra.

El impacto combinado de estas crisis locales, agravadas por el calentamiento global, conduce a sequías, inundaciones, olas de calor, elevación de la marea y derretimiento de glaciares y placas de hielo. Esto podría llevar a los sistemas naturales y las sociedades que dependen de estos ecosistemas a una situación de alta vulnerabilidad.

Por lo anterior las reflexiones, planteadas en este ejemplar de la revista Asuntos, van orientadas a pensar y repensar las situaciones del Desarrollo de América Latina y el Caribe.

La sustentabilidad ambiental en la remoción de Cr (VI) con técnicas de biorremediación *

Dora Luz Gómez Aguilar¹

RESUMEN

Uno de los objetivos de la sustentabilidad ambiental es propender por la conservación de la diversidad genética y biológica, es por esta razón que en la presente ponencia se dan a conocer las técnicas de biorremediación (microorganismos, especies vegetales y bioadsorbentes) que realizan la remoción de Cr (VI) contaminante inorgánico proveniente de fuentes naturales (erupciones volcánicas e incendios forestales) y fuentes antropogénicas (producción minero-metalúrgica, industria química y elaboración de materiales refractarios).

El mayor riesgo de Cromo es por ingestión en alimentos y consumo de agua, pero no puede omitirse el riesgo asociado con la contaminación atmosférica causado por las emisiones de las industrias. El Cromo (VI) es un metal pesado considerado por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) carcinogénico grupo I en humanos, especialmente por el desarrollo de cáncer de pulmón.

En experimentos de Cr (VI) en cultivos de maíz se demostró que las plantas presentaron clorosis, disminución en la concentración de clorofila, disminución en la actividad de la enzima Nitrato Reductasa y la muerte antes de terminar su ciclo fenológico.

Por lo anterior, es fundamental emplear métodos muy eficientes a bajo costo y muy amigables al medio ambiente ventajas de las técnicas de biorremediación.

PALABRAS CLAVE: Sustentabilidad ambiental, Biorremediación, agentes carcinogénicos.

The environmental sustainability in the removal of Cr (VI) by using techniques of bioremediation

ABSTRACT

One of the objectives of environmental sustainability is to strive for the conservation of the genetic and biological diversity, it is for this reason that this presentation, will be focused on the techniques of bioremediation (microorganisms, plant species and bio adsorbents) that perform the removal of Cr (VI) inorganic contaminant from natural sources (volcanic eruptions and forest fires) and anthropogenic sources (mining and metallurgical production, chemistry industry and refractory materials manufacture).

Fecha de Recepción: Noviembre 20 de 2015. Fecha de aceptación: Enero 19 de 2016

Modelo de citación:

GÓMEZ AGUILAR, Dora Luz . LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL EN LA REMOCIÓN DE Cr (VI) CON TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN. Revista Asuntos Económicos y Administrativos No.30, primer semestre 2016. ISSN 0124-1133. Universidad de Manizales. p. 11-

1 Docente de la Universidad Pedagógica Nacional Sede Bogotá (Colombia). Estudiante de Doctorado en Desarrollo Sostenible Universidad de Manizales. Calle 72 No.11-86 Universidad Pedagógica Nacional. Departamento de Química. Bogotá (Colombia). doragomez@gmail.com

The greatest risk of Chrome is by ingestion in food and water consumption, but we cannot omit the risk associated with air pollution caused by emissions from industries. The chromium (VI) is a heavy metal considered by the International Agency for Research on Cancer (IARC) carcinogenic group I in humans, especially for the development of lung cancer.

Experiments of Cr (VI) in corn crops showed that plants presented chlorosis, decrease in the concentration of chlorophyll, decrease in the activity of the enzyme nitrate reductase and death before the end of its phonological cycle.

For the above reasons it is essential to use very efficient methods at low cost and very friendly to the environment, which are the benefits of the bioremediation techniques.

Keywords: environmental sustainability, bioremediation, carcinogenic agents.

Introducción

A nivel mundial es muy importante reducir el impacto ambiental originado por los vertimientos industriales con altas cargas contaminantes de metales pesados en aguas superficiales y en suelos; ya que, día a día se están contaminando más las especies acuáticas y la flora terrestre. Por lo tanto, éstas al ser consumidas por especies mayores de la cadena trófica se presentan los fenómenos de bioacumulación y de biomagnificación en seres humanos, ocasionando en éstos diferentes tipos de enfermedades dependiendo del metal pesado.

Los metales pesados se caracterizan por su alta densidad comparada con respecto al agua, se encuentran en cantidades muy bajas en la corteza terrestre y presentan una alta toxicidad para la célula. Entre los metales pesados con mayor impacto ambiental se encuentran: Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Arsénico (As) y Cr (VI).

En el presente documento se hará referencia únicamente al Cr (VI), con relación a su procedencia a nivel antropogénico, su toxicidad en los seres humanos y en el ambiente, las formas de remoción a nivel de las técnicas de la biorremediación con la interpretación de los posibles mecanismos de remoción y por último se comentarán los tratamientos convencionales que se han utilizado para su remoción.

Biorremediación

“La biorremediación corresponde a la utilización de organismos vivos, especialmente microorganismos, para degradar residuos ambientales. Es una tecnología que, en la actualidad, está experimentando un crecimiento rápido, especialmente en colaboración con la ingeniería genética, la cual se utiliza para desarrollar cepas de microbios que tengan la capacidad de tratar contaminantes específicos. La biorremediación se utiliza particularmente para la rehabilitación

de lugares con residuos y suelos contaminados" (COLIN, 2009). Adicionalmente, fuera de los microorganismos también se emplean otras especies como: Hongos, levaduras, algas, especies vegetales y residuos agrícolas.

El empleo de las especies vegetales se conoce como "fitorremediación, etimológicamente proviene del griego "phyton" = planta y la latín "remedium" = restablecer el equilibrio. La fitorremediación se basa principalmente en las interacciones entre las *plantas*, el *suelo* y los microorganismos. El usar plantas para limpiar suelos y aguas contaminados no es nuevo, los primeros datos que se conocen son del año 1993 pero su innovación empezó en 1996; desde 1993 a la fecha se han publicado 4576 artículos y 483 revisiones de esta temática (Saad, Castillo y Rebolledo 2009, citados en SÁNCHEZ, 2016). Además, desde hace 300 años las plantas fueron propuestas para el uso en el tratamiento de aguas residuales" (SÁNCHEZ, 2016).

Cromo (VI)

"Existen referencias sobre el Cromo; que indican que es un metal pesado. (CHÁVEZ et al. 2007:33). El Cromo está presente en el medio ambiente con diferentes estados de oxidación tales como: Cr (0), Cr (II) , Cr (III) y Cr (VI) , pero las especies de Cr (III) y Cr (VI) son importantes, ya que, el Cr (VI) es 500 veces más tóxico que el Cr (III)" (LOUKIDOU, ZOUBOULIS, KARAPANTSIOS, MATIS, citados en KUMAR & MAJUMDER, 2014:663).

"El Cromo (VI) es tóxico para la mayoría de los organismos. Sus compuestos son corrosivos y la exposición a ellos provoca, independientemente de la dosis, rápidas reacciones alérgicas en la piel. La exposición a corto plazo a altos niveles puede producir úlceras en la piel expuesta, perforaciones de las superficies respiratorias e irritación del conducto gastrointestinal. También se ha observado lesiones renales y hepáticas (USPHS 1997 citado en GONZÁLES B, 2006) A largo plazo en el ámbito laboral en el aire, por encima de los estándares normales se ha vinculado con el cáncer de pulmón. La EPA ha colocado al Cr (VI) en la posición cuatro de la lista de sustancias clasificadas según su potencial carcinógeno, grupo A, asimismo la International Agency for Research on Cancer (IARC 1998) ha clasificado los compuestos de Cr (VI) como carcinógenos". (GONZÁLES B: 2006).

El Cr (VI) presente en los suelos puede reducirse a Cr (III) en presencia de sulfuros y hierro (II) (condiciones anaeróbicas) y a su vez cuando hay altas concentraciones de materia orgánica, evitando así los problemas de intoxicación, pero origina que el Cromo se ha retenido por más tiempo en el suelo. Cuando hay altas concentraciones

de Cr (VI) es "tóxico para las plantas, provocando clorosis generalizada, semejante a la deficiencia de hierro debido a que causa un daño directo en el nivel de DNA, provocando daños genotóxicos y muerte celular en la planta. Además, disminuye la síntesis de clorofila y en consecuencia afecta la fijación del CO₂, el metabolismo de carbohidratos (0,01 -1 mg/L) y no se concluye el ciclo fenológico (desarrollo, floración, producción de fruto y llenado de grano)" (GONZÁLES: 2006).

Registros de biorremediación de Cr (VI)

A continuación, se reportan en las tablas No. 1, 2 y 3 datos de remoción de Cr (VI) obtenidos con diferentes especies: Bacterias, hongos, levaduras y algas con su respectiva capacidad de adsorción. Adicionalmente, se hace una breve descripción acerca de los residuos agrícolas, especies vegetales y otros materiales inertes que actualmente, se emplean en la remoción de Cr (VI).

Tabla 1: Bacterias que remueven Cr (VI) (SAHA & ORVIG, 2010)

Nombre de la bacteria	Capacidad de adsorción, a (mg/g), b (eficiencia de remoción en %)
Active sludge bacteria	3.2 mg g ⁻¹ min ⁻¹
Aeromonas caviae	284.44 (a)
Aeromonas caviae	124.46 (a)
Bacillus circulans	34.5 (a)
Bacillus megaterium (muerta)	30.7 (a)
Bacillus coagulans (muerta)	39.9 (a)
Bacillus coagulans (viva)	23.8 (a)
Bacillus licheniformis	69.35 (a)
Bacillus thuringiensis (vegetativa)	83.33 (a)
Bacillus thuringiensis (mezcla espora-cristal)	72.99 (a)
Biofilm de E. coli sobre carbón	97.70 (a)
Corynebacterium glutamicum	95 (b)
Chroococcus sp. HH-11	21.36 (a)
E. coli ASU 7	64.36 (a)
Nostoc muscorum	22.92 (a)
Nostos calcicola HH-12	12.23 (a)
Ochrobactrum anthropi	86.20 (a)
Pseudomonas sp.	95 (a)
Phormidium sp.	24.3 (a)
Pseudomonas aeruginosa y Bacillus subtilis	1.44 (a)
Staphylococcus xylosus	143 (a)
Zoogloea ramigera	3.4 mg g ⁻¹ min ⁻¹

Tabla 2: Hongos y Levaduras que remueven Cr (VI) (SAHA & ORVIG, 2010)

Nombre del hongo	Capacidad de adsorción, a (mg/g), b (eficiencia de remoción en %)
<i>Aspergillus niger</i>	30.1 (a)
<i>Aspergillus flavus</i>	0.335 (a)
<i>Aspergillus sydoni</i>	9.07 (a)
<i>Aspergillus niger</i>	17.61 (a)
<i>Aspergillus niger</i>	117.33 (a)
<i>Aspergillus niger</i>	29.3 (b)
<i>Aspergillus niger</i> MTCC2594	3.0 (a)
<i>Agaricus bisporus</i>	8 (a)
<i>Candida intermedia</i>	0.021 (a)
<i>Coriolus versicolor</i> (HT)	62.89 (a)
<i>Coriolus versicolor</i> (UT)	44.25 (a)
<i>Fusarium</i> sp.	50.25 (a)
<i>Lentinus sajor-caju</i> (sin tratar)	0.363 mmol g ⁻¹
<i>Lentinus sajor-caju</i> (libre)	23.32 (a)
<i>Lentinus sajor-caju</i> (inmovilizada)	39.57 (a)
<i>Lentinus sajor-caju</i> (tratada con calor)	0.613 mmol g ⁻¹
<i>Mucor hiemalis</i>	53.5 (a)
<i>Neurospora crassa</i> (Pre-tratada con ácido acético)	15.85 (a)
<i>Penicillium janthinellum</i>	9.35 (a)
<i>Penicillium purpurogenum</i>	40 (a)
<i>Penicillium chrysogenum</i>	40.3 (a)
<i>Rhizopus arrhizus</i>	23.92 (a)
<i>Rhizopus arrhizus</i>	8.40 mg g ⁻¹ min ⁻¹
<i>Rhizopus arrhizus</i>	78 (a)
<i>Rhizopus arrhizus</i>	23.88 (a)
<i>Rhizopus nigricans</i>	49.81 (a)
<i>Rhizopus nigricans</i> (polacrilamida)	21.22 (a)
<i>Rhizopus oryzae</i>	23.5 (b)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	44.2 (b)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0.56 (a)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	6.3 (a)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	32.6 (a)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	6.607 (a)
Levadura modificada	94.34 (a)
Biomasa de hongos de té (viva)	30.8 (b)
Biomasa de hongos de té (seca)	74.15 (b)
<i>Trametes versicolor</i>	32.2 (b)
Biomasa de levadura	89.95 (a)
<i>Yarrowia lipolytica</i> (NCIM-3589)	63.73 (a)
<i>Yarrowia lipolytica</i> (NCIM-3590)	46.09 (a)

Tabla 3: Algas que remueven Cr (VI) (SAHA & ORVIG, 2010)

Nombre de la alga	Capacidad de adsorción, a (mmol/g), c (mg/g), b (eficiencia de remoción en %)
<i>Chlorella vulgaris</i>	27.77 (c)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	21.2 (c)
<i>Chlorella vulgaris</i>	79.3 (c)
<i>Cystoseira indica</i>	20.9-27.9 (a)
<i>Cladophora albida</i>	41.7 (a)
<i>Fucus vesiculosus</i>	0.82 (a)
<i>Fucus spiralis</i>	0.68 (a)
<i>L. japonica</i>	59.35 (c)
<i>Oedogonium hatei</i>	31.0 (c)
<i>Padina (alga marrón)</i>	54.6 (c)
<i>Pilayella littoralis</i>	90 $\mu\text{mol g}^{-1}$
<i>P. yezoensis</i> Ueda	56.32 (c)
<i>Palmaria palmata</i>	0.65 (a)
<i>Polyshiponia lanosa</i>	0.88 (a)
<i>Rhizoclonium heiroglyphicum</i>	11.81 (c)
<i>Sargassum sp.</i>	68.94 (c)
<i>Sargassum (alga marrón)</i>	31.7 (c)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	58.8 (c)
<i>Sargassum sp.</i>	65 (b)
<i>Sargassum siliculosum</i>	66.4 (c)
<i>Spirogyra condensata</i>	14.82 (c)
<i>Spirogyra sp.</i>	14.7 (a)
<i>Ulva lactuta</i>	0.53 (a)
<i>Ulva lactuta</i>	92 (b)
<i>Ulva sp.</i>	0.58 (a)
<i>Turbinaria ornate</i>	65 (b)

A nivel de los bioadsorbentes de residuos agrícolas (AWBs) se encuentran más de cien publicaciones en donde se realizan investigaciones desde cáscaras de frutas, semillas de frutas, corteza de árboles, cáscaras de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de café y hojas. Cabe resaltar, que los bioadsorbentes nombrados anteriormente no presentan ninguna modificación química en su estructura inicial. En la actualidad, para mejorar el rendimiento de éstos bioadsorbentes, se han empleado técnicas de calcinación, tratamiento con ácidos y bases con los cuales se ha detectado que la mayoría de estas modificaciones mejoran la remoción de Cr (VI).

Con respecto, a otros materiales que son inertes aparecen más de cincuenta publicaciones en los cuales se han empleado carbón, bentonita, quitosan, ácidos húmicos, dióxido de titanio entre otros.

A nivel de la remoción con especies vegetales se encuentran reportadas las siguientes especies: El Helechito de agua (FERNÁN-

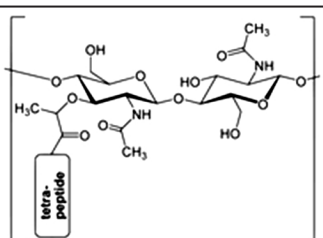
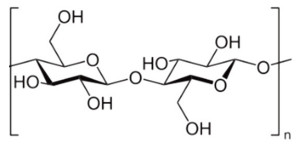
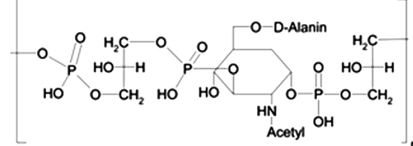
DEZ et al: 2007) las plantas *Canna glauca*, *Canna indica*, *Helianthus annuus*, *Prosopis laevigata*, *Nymphacea alba* L, *Vetiveria zizarioides* (QUEZADA-VARELA : 2012), *Eichhornia crassipes*, *Cyperus papyrus*, *Spathiphyllum wallissi* y *Dracaena braunii* (SANCHEZ: 2016).

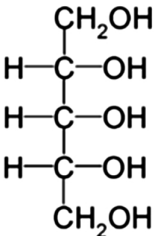
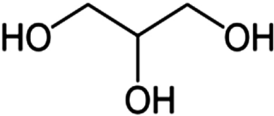
Resultados biorremediación

Con los anteriores reportes, se observa el gran número de investigaciones que se han realizado para la remoción de este contaminante inorgánico, planteando posibles mecanismos de remoción. La mayoría de autores, argumenta la atracción de cargas electrostáticas entre las especies de biorremediación (bioadsorbentes) y el contaminante. Teniendo en cuenta lo anterior, específicamente estas atracciones se generan porque en las paredes celulares tanto de bacterias, hongos, levaduras y algas se encuentran presentes una serie de compuestos de carga opuesta a la del contaminante permitiendo de esta manera su atracción y posterior remoción en el medio en el que se encuentra (agua o suelos). Por esta razón, a continuación se reportan los compuestos presentes en las paredes celulares con sus respectivas estructuras químicas, de las especies mencionadas anteriormente. A nivel bacteriano, se plantea que las paredes celulares de las bacterias Gram-positivas y Gram-negativas contienen los compuestos que aparecen en las Tablas No 4 y No. 5 respectivamente.

Bacterias gram positivas

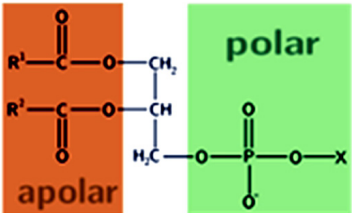
Tabla No. 4 Compuestos presentes en las paredes celulares de las bacterias Gram Positivas

Compuesto	Estructura química
Peptidoglicano	
Polisacáridos	
Acidos Teicoicos	

Ribitol	
Glicerol	
Glicolípidos, Polímeros del ácido amino manurónico o ácido galacturónico	

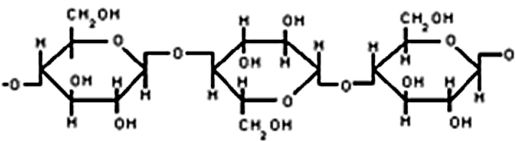
Bacterias gram negativas

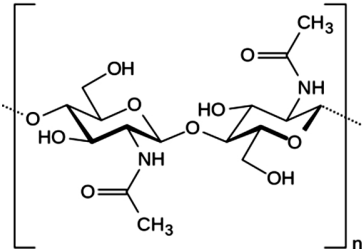
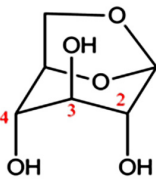
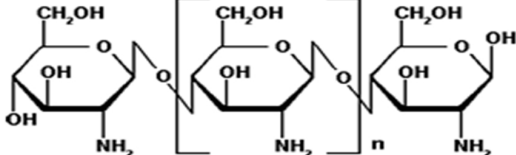
Tabla No. 5 Compuestos presentes en las paredes celulares de las bacterias Gram Negativas

Compuesto	Estructura química
Peptidoglicano, Lipoproteínas y Porinas	
Fosfolípidos	

A nivel de los compuestos químicos presentes en las paredes celulares de los hongos se reportan en la Tabla No. 6.

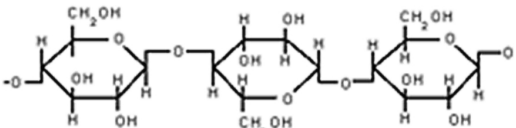
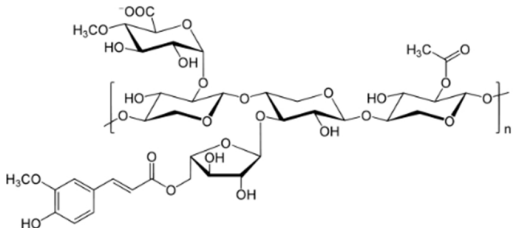
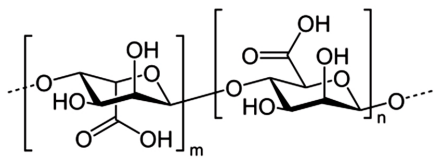
Tabla No. 6 Compuestos presentes en las paredes celulares de los hongos

COMPUESTO	ESTRUCTURA QUÍMICA
Celulosa	

Quitina	
Glucano	
Quitosan	

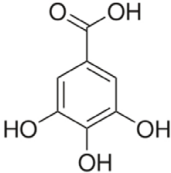
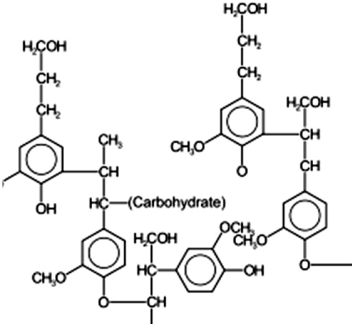
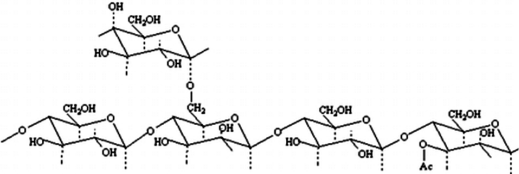
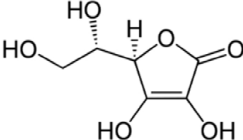
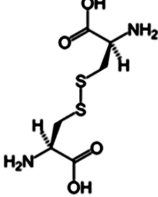
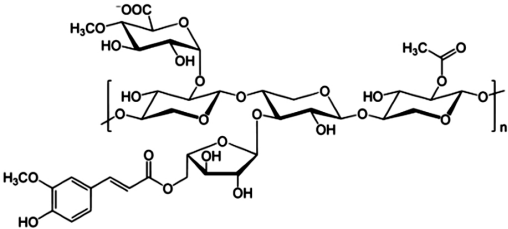
A nivel de los compuestos químicos presentes en las paredes celulares de las algas verdes, café y rojas se reportan en la Tabla N° 7, incluyendo los mananos.

Tabla No. 7 Compuestos presentes en las paredes celulares de las algas

Compuesto	Estructura química
Celulosa	
Xilanos	
Ácido Alginico	

A nivel de los compuestos presentes en los residuos agrícolas se reportan en la Tabla No, 8.

Tabla No. 8 Compuestos presentes en residuos agrícolas

Compuesto	Estructura química
Taninos	
Lignina	
Galactoglucomananos	
Ácido Ascórbico	
Cistina	
Xilanos	

Resultados y conclusiones

Al observar las estructuras químicas, responsables de la atracción electrostática entre el bioadsorbente con el contaminante, se observa que en la mayoría de éstas predominan grupos funcionales (hidroxilos, amidas, fosfodiéster, aminas, cetonas, éster, ácidos carboxílicos y puentes disulfuro). Pero, definitivamente el que más predomina en la mayoría de las estructuras químicas son los grupos hidróxilos.

El mecanismo de adsorción probable presente entre las bacterias, hongos, levaduras y algas con relación al contaminante puede ser porque los grupos hidróxilos, fosfodiéster y amidas presentes en sus paredes celulares actuarían como bases de Lewis; ya que, pueden ceder su par electrónico al contaminante Cr^{+6} el cual es deficiente en electrones.

El mecanismo de adsorción probable presente entre los residuos agrícolas con relación al contaminante $Cr(VI)$ puede presentarse de dos maneras. Debido a que, para llevar a cabo los procesos de bioadsorción en residuos agrícolas se debe ajustar el pH en condiciones ácidas para obtener el mayor porcentaje de remoción del contaminante, generalmente entre el intervalo de pH 2 a 4 estos valores se han obtenido en estudios de cinéticas de reacción. En la primera propuesta, se tendría que cuando disminuye el pH los grupos que tienden a ser ácidos como: Hidróxilos y grupos carboxilo estos presentan un valor de pK_a , haciendo que si su pH es inferior al pK_a por lo tanto los grupos no se disocian y tienden a tener un comportamiento ácido. De esta forma, tendrían el mismo mecanismo de adsorción al propuesto para bacterias, hongos, levaduras y algas. Pero, cuando el pH es mayor al pK_a estos grupos se disociarían y se comportarían como bases conjugadas de Bronsted-Lowry siendo altamente nucleofílicas para poder así remover al contaminante y como presentan varios grupos idénticos en toda su estructura química cada uno actuaría como un nucleófilo teniendo así un alto porcentaje de remoción inclusive a concentraciones altas del contaminante en un tiempo corto, presentando de esta manera una ventaja con respecto a los métodos convencionales.

Es importante caracterizar físico-químicamente al bioadsorbente antes y después de la remoción, para poder establecer el mecanismo de adsorción con el contaminante. Las técnicas más utilizadas son: FTIR (en esta técnica se determina los grupos funcionales de carácter orgánico presentes en el bioadsorbente), Espectrofotometría UV-Visible para determinar la presencia de anillos aromáticos en la región UV, porosimetría para establecer el tamaño de poro del bioadsorbente, las técnicas de microscopía electrónica (SEM) y de transmisión electrónica (TEM) para determinar la morfología del bioadsorbente y la

técnica de Difracción de Rayos X (XRD) para entender la naturaleza de adsorción del Cromo.

La cuantificación de Cr (VI) se realiza por la técnica de la 1,5 difenilcarbazida (método de espectrofotometría visible) y el Cromo total por el método de absorción atómica donde se cuantifican las especies de Cr (III) y Cr (VI), para determinar de esta forma si se presenta la reducción o no de Cr(VI) por los bioadsorbentes.

Es importante realizar ensayos con mezclas de bioadsorbentes provenientes de residuos agrícolas, para poder remover no sólo un contaminante sino varios metales pesados presentes en una muestra de agua residual industrial, agua superficial, aguas marinas y suelos.

Emplear un proceso de desorción del bioadsorbente con el objetivo de poder ser reutilizado en más procesos de descontaminación de aguas y suelos. A su vez, poder recuperar los metales obtenidos de la desorción para incluirlos nuevamente en procesos industriales y con la biomasa de los bioadsorbentes poder emplearlos como compostaje en suelos.

Poder incursionar en el campo de la comercialización de los bioadsorbentes con residuos agrícolas; ya que, a nivel de microorganismos, hongos, levaduras y algas ya actualmente, se están comercializando. Por lo tanto, sería importante implementar estos bioadsorbentes de residuos agrícolas en plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, para minimizar de esta forma el impacto ambiental que actualmente están ocasionando en el ecosistema.

A nivel de la fitorremediación, lo que se está haciendo actualmente es obtener plantas transgénicas, para hacer que estas especies vegetales presenten una mayor capacidad de remoción para los diferentes contaminantes.