

Eichhornia crassipes (Mart.) Solms: an integrated phytoremediation and bioenergy system

Eichhornia crassipes (Mart.) Solms: un sistema integral de fitorremediación y bioenergía

Uriel F. Carreño-Sayago* & Camila Rodríguez-Parra

Fundación Universitaria Los Libertadores, Facultad de Ingeniería. Carrera 16 núm. 63 A – 68. Bogotá, Colombia.

*Corresponding author: ufcarrenos@libertadores.edu.co, tel.: 3214251535

Abstract

Introduction: *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms is an aquatic plant that reproduces rapidly in polluted water. Due to the high adsorption capacity of heavy metals, the plant is used as a phytoremediation agent; its biomass can also be used for biofuel production.

Objective: To compile information on state-of-the-art water treatment processes and biofuel production with *E. crassipes* to design an integrated biohydrogen and bioethanol production process with the plant's biomass.

Materials and methods: The available literature on *E. crassipes* was reviewed to analyze the designs and propose an integrated phytoremediation and bioenergy system.

Results and discussion: The proposed design can be adjusted to industrial scale conditions. This design includes a phytoremediation system, a bioreactor to generate hydrolysis, a bioreactor to generate bioethanol and, finally, a bioreactor to generate hydrogen.

Conclusions: By consulting the state of the art of the proposed designs, it is possible to create and construct, on a large scale, a system for producing bioethanol and biohydrogen from *E. crassipes* biomass (loaded or not with heavy metals). In this way, the plant biomass is not wasted as it is today.

Keywords: water hyacinth; bioreactor; bioethanol; biohydrogen; adsorption; heavy metals.

Resumen

Introducción: *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms es una planta acuática que se reproduce rápidamente en aguas contaminadas. Debido a la alta capacidad de adsorción de metales pesados, la planta se utiliza como agente fitorremediador; su biomasa también puede ser usada para la producción de biocombustibles.

Objetivo: Recopilar el estado del arte sobre los procesos de tratamiento de aguas y producción de biocombustibles con *E. crassipes* para diseñar un proceso integral de producción de biohidrógeno y bioetanol con la biomasa de la planta.

Materiales y métodos: Se revisó la literatura disponible sobre *E. crassipes* para analizar los diseños y proponer un sistema integrado de fitorremediación y bioenergía.

Resultados y discusión: El diseño propuesto se puede ajustar a las condiciones de escala industrial. Este diseño abarca un sistema de fitorremediación, un biorreactor para generar hidrólisis, un biorreactor para la generación de bioetanol y, por último, un biorreactor para generar hidrógeno.

Conclusiones: A través de la consulta del estado del arte de los diseños propuestos es posible crear y construir, a gran escala, un sistema de producción de bioetanol y biohidrógeno a partir de biomasa de *E. crassipes* (cargada o no con metales pesados). De esta manera, la biomasa de la planta no se desperdicia como ocurre en la actualidad.

Palabras clave: jacinto de agua; biorreactor; bioetanol; biohidrógeno; adsorción; metales pesados.

Introduction

The macrophyte *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms is considered an invasive species that adapts to a wide range of ecosystems and significantly affects the natural balance of lakes and lagoons (Abdel-Fattah & Abdel-Naby, 2012; Ganguly, Chatterjee, & Dey, 2012; Riaño, 2010). According to the Bogotá mayor's office, 500 t of the plant were extracted in the Juan Amarillo wetland in the western part of the Colombian capital in 2010 (Trujillo, Rial, Canon, Rojas, & Sierra, 2010).

In recent years it has been shown that *E. crassipes* can be treated sustainably; to this end, projects have been designed and implemented for environmental and biofuel generation purposes (Park, Anburajan, Kumar, Park, & Kim, 2017; Rahman et al., 2016; Rani, Singh, & Shimrah, 2017). Several investigations have taken advantage of *E. crassipes* biomass to design and set up phytoremediation processes, retaining heavy metals or other pollutants in industrial water (Bronzato, 2016; Nagarajan, Lee, Kondo, & Chang, 2016; Park et al., 2016; Rahman et al., 2016; Ri, Ren, Ding, Kim, & Guo, 2017; Riaño, 2010). Another important aspect is that *E. crassipes* has low lignin content (10 %) and a high amount of cellulose (28 %) and hemicellulose (33 %); the latter two compounds are easily converted into fermentable sugar, through a chemical process called hydrolysis, and therefore the production of biofuels such as bioethanol and biohydrogen with *E. crassipes* is totally viable (Ganguly et al., 2012; Kumar, Singh, & Ghosh, 2009; Mishima et al., 2008; Balasubramanian, Arunachalam, Das, & Arunachalam, 2012). According to Sayago (2019), phytoremediation and bioenergy production processes can be combined to obtain bioethanol with the *E. crassipes* biomass used in chromium (VI) removal.

The main objective of this article was to compile information on the state of the art of water treatment processes and biofuel production with *E. crassipes*, in order to design an integrated process for the production of biohydrogen and bioethanol with the biomass of the plant used in the phytoremediation of heavy metals.

Materials and methods

Information on the capacity of *E. crassipes* in phytoremediation and bioenergy was reviewed in the research available in databases such as Science Direct and Scopus. The results of such research were compared, and an integrated phytoremediation and bioenergy process was designed.

Introducción

La macrófita *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms es considerada una especie invasiva que se adapta a un amplio tipo de ecosistemas y que afecta considerablemente el equilibrio natural de lagunas y lagos (Abdel-Fattah & Abdel-Naby, 2012; Ganguly, Chatterjee, & Dey, 2012; Riaño, 2010). Según la alcaldía mayor de Bogotá, en el 2010 se extrajeron 500 t de la planta en el humedal Juan Amarillo que se encuentra en el occidente de la capital colombiana (Trujillo, Rial, Canon, Rojas, & Sierra, 2010).

En los últimos años se ha demostrado que *E. crassipes* se puede tratar de manera sostenible; para ello, se han diseñado e implementado proyectos con propósitos de índole ambiental y generación de biocombustibles (Park, Anburajan, Kumar, Park, & Kim, 2017; Rahman et al., 2016; Rani, Singh, & Shimrah, 2017). En varias investigaciones se ha aprovechado la biomasa de *E. crassipes* para diseñar y montar procesos de fitorremediación, reteniendo metales pesados u otros contaminantes en las aguas industriales (Bronzato, 2016; Nagarajan, Lee, Kondo, & Chang, 2016; Park et al., 2016; Rahman et al., 2016; Ri, Ren, Ding, Kim, & Guo, 2017; Riaño, 2010). Otro aspecto importante es que *E. crassipes* tiene bajo contenido de lignina (10 %) y alta cantidad de celulosa (28 %) y hemicelulosa (33 %); estos dos últimos compuestos se convierten fácilmente en azúcar fermentable, a través de un proceso químico llamado hidrólisis, por tanto, la producción de biocombustibles como bioetanol y biohidrógeno con *E. crassipes* es totalmente viable (Ganguly et al., 2012; Kumar, Singh, & Ghosh, 2009; Mishima et al., 2008; Balasubramanian, Arunachalam, Das, & Arunachalam, 2012). De acuerdo con Sayago (2019), los procesos de fitorremediación y producción de bioenergía se pueden combinar obteniendo bioetanol con la biomasa de *E. crassipes* utilizada en la remoción de cromo (VI).

El objetivo principal de este artículo fue recopilar el estado del arte de los procesos de tratamiento de aguas y producción de biocombustibles con *E. crassipes*, para diseñar un proceso integral de producción de biohidrógeno y bioetanol con la biomasa de la planta utilizada en la fitorremediación de metales pesados.

Materiales y métodos

La capacidad de *E. crassipes* en fitorremediación y bioenergía se consultó en las investigaciones disponibles en bases de datos como Science Direct y Scopus. Los resultados de tales investigaciones se confrontaron y se diseñó un proceso integral de fitorremediación y bioenergía.

Characterization of the *Eichhornia crassipes* plant

The plant *E. crassipes*, also known as “water hyacinth”, is a floating freshwater vascular macrophyte native to southern South America (Brazil and the equatorial region). The stems and leaves are made up of air-filled sacs that allow the plant to be permanently suspended on the water’s surface. *Eichhornia crassipes* has both sexual and asexual reproduction and is prevalent mainly in tropical and subtropical water bodies (Vasquez, 2012).

The species *Eichhornia crassipes* is considered invasive due to its adaptability to various ecosystems. The plant considerably affects the natural balance of aquatic systems (lagoons, lakes and wetlands) and feeds mostly on the concentration of nutrients in agro-industrial effluents and deforestation residues (Carreño, 2016a; Kumar et al., 2009).

Currently, *E. crassipes* biomass transformation is a promising source for the creation of truly sustainable alternative energies. Among its main attributes is the very low lignin content in contrast to the high cellulose content per unit volume of dry matter (Table 1), characteristics that make the plant easily degraded. Related research has found a high degree of cellulose (28 %) and hemicellulose (33 %) and little lignin (10 %), this being a determining factor for the development of bioprocesses that can transform these sugars into biofuels (Chuang et al., 2011; Mishima et al., 2008). Lignin is an amorphous polymer with a very complex molecular structure, similar to asphalt; it has a high molecular weight and is therefore very difficult to fractionate, and it is insoluble in acids and soluble in strong alkalis such as sodium hydroxide. On the other hand, hemicellulose and cellulose are linear or fibrous structure biopolymers tightly bound by hydrogen bonds between the hydroxyl groups of different juxtaposed sugar chains (monosaccharides), such as

Caracterización de la planta *Eichhornia crassipes*

La planta *E. crassipes*, también conocida como “jacinto de agua” o “buchón de agua”, es una macrófita vascular flotante de agua fresca, originaria del sur de América (Brasil y región ecuatorial). Los tallos y hojas están conformados por sacos llenos de aire que le permiten a la planta estar suspendida permanentemente en la superficie del agua. *Eichhornia crassipes* presenta tanto reproducción sexual como asexual y prevalece principalmente en cuerpos de agua tropicales y subtropicales (Vásquez, 2012).

La especie *Eichhornia crassipes* es considerada invasiva debido a su adaptabilidad a varios ecosistemas. La planta afecta considerablemente el equilibrio natural de sistemas acuáticos (lagunas, lagos y humedales) y se alimenta mayormente de la concentración de nutrientes en efluentes de la agroindustria y de los residuos de la deforestación (Carreño, 2016a; Kumar et al., 2009).

Actualmente, la transformación de la biomasa de *E. crassipes* es una fuente prometedora para la creación de energías alternativas, verdaderamente sostenibles. Entre sus principales atributos se encuentra el muy bajo contenido de lignina en contraste con el contenido alto de celulosa por unidad de volumen de materia seca (Cuadro 1), características que hacen que la planta sea degradada fácilmente. Las investigaciones relacionadas han encontrado un grado alto de celulosa (28 %) y hemicelulosa (33 %) y poca lignina (10 %), siendo esto un factor determinante para la realización de bioprocesos que puedan transformar estos azúcares en biocombustibles (Chuang et al., 2011; Mishima et al., 2008). La lignina es un polímero amorfo con una estructura molecular muy compleja, similar al asfalto; tiene un elevado peso molecular y, por consiguiente, es muy difícil de fraccionar; y es insoluble en ácidos y soluble en álcalis fuertes como el hidróxido de

Table 1. Composition of *Eichhornia crassipes* biomass.

Cuadro 1. Composición de la biomasa de *Eichhornia crassipes*.

Lignin (%)/ Lignina (%)	Cellulose (%)/ Celulosa (%)	Hemicellulose (%)/ Hemicelulosa (%)	Others (%)/ Otros (%)	Reference/ Referencia
1.1	17.3	24.7	-	Chuang et al. (2011)
4.1	19.7	27.1	-	Mishima et al. (2008).
3.5	18.2	48.7	13.3	Magdum, More, and Nadaf (2012)
1.1	17.3	24.7	-	Lay et al. (2013)
11	31	27	10	Tan et al. (2008)
11	27	27	10	Zhou et al. (2009)
12	36	42	-	Balasubramanian et al. (2012)

glucose, galactose or fructose (Zhou et al., 2009). The use of the plant as a by-product has simply consisted of direct burning to provide some energy requirement (Balasubramanian et al., 2012; Mishima et al., 2008; Tan et al., 2006).

Eichhornia crassipes as a phytoremediation agent

Phytoremediation with *E. crassipes* represents an efficient and economical technology for the treatment of water contaminated with nutrients, heavy metals and high organic matter contents, since it does not require sophisticated infrastructure (Abdelraheem, Komy, & Ismail, 2017; Mahunon et al., 2018; Martínez et al., 2013).

Industrial water treatment systems with *E. crassipes* have been implemented, consisting of the use of the live plant together with contaminated water for the removal of heavy metals. For the removal of chromium (IV), a wetland with *E. crassipes* was designed and constructed, evaluating the removal of various concentrations of this contaminant. Artificial photosynthesis was carried out at 30 °C and relative humidity of 60 %, obtaining removals, on average, of 70 % in 21 days of treatment (Gupta & Balomajumder, 2015; Hadad, Maine, Mufarrege, Del Sastre, & Di Luca, 2011). For the treatment of zinc-contaminated water, the plant cultivated in water at pilot scale was used to assess initial concentrations of 5.0, 10.0, 15.0 and 20.0 mg·L⁻¹ in two to 15 days; the removals obtained were around 90 % zinc (Borker, Mane, Saratale, & Pathade, 2013; Swain, Adhikari, & Mohanty, 2014).

Treatment systems with living plants are interesting, but they are far from being ideal treatment systems due to the large amount of time the plant needs to remove heavy metals. For this reason, the use of dried, ground *E. crassipes* material for the creation of biological filters has been started; the cationic exchange between the hydrogen bonds of the plant's functional groups with zinc (II), chromium (VI), cadmium (II) and arsenic (III) favors the adsorption of these pollutants (Adanikin, Ogunwande, & Adesanwo, 2017; Martínez et al., 2013; Saraswat & Rai, 2010; Sarkar, Rahman, & Bhoumik 2017; Thi, Ong, Thi, & Ju, 2017). Sarkar et al. (2017) also designed filters with 20 g of dried, ground *E. crassipes* biomass for vertical downflow treatments; 5 L of polluted water from a tannery were treated, removing 75 % chromium (VI) with initial concentrations of 200 mg·L⁻¹. The adsorption mechanism of uranium by batches from dried, crushed *E. crassipes* biomass has also been experimented. The results showed that uranium (VI) adsorption was highly Ph-dependent, concluding that the best pH for future removal designs is 5.5. U (VI) adsorption proceeded rapidly with an equilibrium time of 30 min and conformed to second-order kinetics (Yi et al., 2016).

sodio. Por otro lado, la hemicelulosa y la celulosa son biopolímeros de estructura lineal o fibrosa unidos fuertemente por puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de azúcares (monosacáridos), tales como glucosa, galactosa o fructosa (Zhou et al., 2009). El aprovechamiento de la planta como subproducto ha consistido simplemente en la quema directa para proporcionar algún requerimiento energético (Balasubramanian et al., 2012; Mishima et al., 2008; Tan et al., 2006).

Eichhornia crassipes como agente fitorremediador

La fitorremediación con *E. crassipes* representa una tecnología eficiente y económica para el tratamiento de agua contaminada con nutrientes, metales pesados y contenidos altos de materia orgánica, puesto que no requiere de infraestructura sofisticada (Abdelraheem, Komy, & Ismail, 2017; Mahunon et al., 2018; Martínez et al., 2013).

Se han utilizado sistemas de tratamiento de aguas industriales con *E. crassipes* que consisten en la utilización de la planta viva junto con agua contaminada para la remoción de metales pesados. Para la remoción de cromo (IV) se diseñó y construyó un humedal con *E. crassipes*, evaluando la remoción de varias concentraciones de este contaminante. La fotosíntesis artificial se llevó a cabo a 30 °C y humedad relativa de 60 %, obteniendo remociones, en promedio, de 70 % en 21 días de tratamiento (Gupta & Balomajumder, 2015; Hadad, Maine, Mufarrege, Del Sastre, & Di Luca, 2011). Para el tratamiento de aguas contaminadas con zinc, se utilizó la planta cultivada en agua a escala piloto evaluando concentraciones iniciales de 5.0, 10.0, 15.0 y 20.0 mg·L⁻¹ en dos a 15 días; las remociones obtenidas fueron de alrededor 90 % de zinc (Borker, Mane, Saratale, & Pathade, 2013; Swain, Adhikari, & Mohanty, 2014).

Los sistemas de tratamiento con plantas aún vivas son interesantes, pero distan de ser sistemas de tratamiento idóneos, debido a la gran cantidad de tiempo que necesita la planta para remover los metales pesados. Por esta razón se ha puesto en marcha la utilización de un material seco y molido de *E. crassipes* para la creación de filtros biológicos; el intercambio catiónico entre los enlaces de hidrógeno de los grupos funcionales de la planta con el zinc (II), cromo (VI), cadmio (II) y arsénico (III) favorece la adsorción de estos contaminantes (Adanikin, Ogunwande, & Adesanwo, 2017; Martínez et al., 2013; Saraswat & Rai, 2010; Sarkar, Rahman, & Bhoumik 2017; Thi, Ong, Thi, & Ju, 2017). Sarkar et al. (2017) también diseñaron filtros con 20 g de biomasa seca y molida de *E. crassipes* para tratamientos de flujo descendente vertical; se trataron 5 L de agua contaminada de una curtiembre, removiendo 75 % de cromo (VI) con concentraciones iniciales de 200 mg·L⁻¹. También se ha experimentado el mecanismo

Transformation of *Eichhornia crassipes* biomass

In order to optimize industrial wastewater treatment, a chemical or physical modification of the *E. crassipes* biomass can be made to achieve structural durability and efficient adsorption capacity of heavy metal ions and other pollutants (Hokkanen, Repo, & Sillanpää, 2013). An alternative is the use of iron (Fe) (III) by impregnation with iron chloride to the surface of *E. crassipes*. This chemical procedure has been used for the adsorption of heavy metals and dyes. Iron (III) oxyhydroxide reacts with hydratable hydroxyls of the *E. crassipes* cellulose forming iron hydroxides (FeOOH); the metal ions enter the interior of *E. crassipes* with FeOOH, exchanging with protons of hydroxyl groups. The ionic interaction is mainly responsible for the adsorption of As (III), As (VI) and Cr (IV) (Lin, Yang, Na, & Lin, 2018; Wei, Fang, Zheng, & Tsang, 2017).

A network composed of *E. crassipes* cellulose, chitosan and titanium oxide (TiO₂) has been investigated, achieving over 90 % removal of industrial dyes as a function of pH. There is an electrostatic interaction between the negatively charged hydroxyl groups of cellulose fibers of *E. crassipes* together with the NH⁺ (III) anion of the chitosan; TiO₂ binds to this compound and forms a chelating network, increasing the cation exchange capacity (El-Zawahry, Abdelghaffar, Abdelghaffar, & Hassabo, 2016).

A widely used process for the transformation of *E. crassipes* biomass is the creation of cellulose xanthogenate ((Cell-OCS₂)₂ Mg) developed by Tan et al. (2008) and Deng et al. (2009). This procedure consists of taking dried, ground *E. crassipes* biomass and adding sodium hydroxide (NaOH), creating alkaline biomass; it is then esterified with carbon disulfide (CS₂) and finally treated with magnesium sulphate (MgSO₄) to prepare cellulose xanthogenate. Zhou et al. (2011) characterized three types of xanthogenate biomasses: *E. crassipes*, rapeseed straw and cornstalk; the authors concluded that *E. crassipes* has more hydroxyl (OH) and carbonyl (C=O) groups than the other two plant compounds after alkalization with NaOH, increasing the adhesion of magnesium (Mg) and sulfur (S), to obtain cellulose xanthogenate. Mg and S₂ are responsible for cation exchange with lead (II), removing 90 % with initial concentrations of 500 mg·L⁻¹ (Tan et al., 2008).

E. crassipes biomass has been bound to another type of polysaccharide such as chitosan, creating microspheres with sodium tripolyphosphate (TPP) solution. The cellulose fibers of *E. crassipes* were embedded in the chitosan matrix. In the experimental treatment, these spheres removed about 95 % lead (II) with an initial concentration of 100 mg·L⁻¹. The lead was adhered to the gelled cellulose compound of *E. crassipes* and chitosan through a chemisorption cation exchange

de adsorción de uranio por lotes, a partir de biomasa seca y triturada de *E. crassipes*. Los resultados mostraron que la adsorción de uranio (VI) fue altamente dependiente del pH, concluyendo que el mejor pH para diseños futuros de remoción es de 5.5. La adsorción de U (VI) avanzó rápidamente con un tiempo de equilibrio de 30 min y se ajustó a una cinética de segundo orden (Yi et al., 2016).

Transformación de la biomasa de *Eichhornia crassipes*

Con el fin de optimizar el tratamiento de aguas residuales industriales, se puede realizar una modificación química o física de la biomasa de *E. crassipes* para lograr durabilidad estructural y capacidad de adsorción eficiente de los iones de metales pesados y otros contaminantes (Hokkanen, Repo, & Sillanpää, 2013). Una alternativa es el uso de hierro (Fe) (III) mediante la impregnación con cloruro de hierro a la superficie de *E. crassipes*. Este procedimiento químico se ha utilizado para la adsorción de metales pesados y colorantes. El oxihidróxido de hierro (III) reacciona con hidroxilos hidratables de la celulosa de *E. crassipes* formando hidróxidos de hierro (FeOOH); los iones metálicos ingresan al interior de *E. crassipes* con FeOOH, intercambiándose con protones de grupos hidroxilos. La interacción iónica es principalmente responsable de la adsorción de As (III), As (VI) y Cr (IV) (Lin, Yang, Na, & Lin, 2018; Wei, Fang, Zheng, & Tsang, 2017).

Una red compuesta por celulosa de *E. crassipes*, quitosano y óxido de titanio (TiO₂) se ha investigado, experimentando remociones superiores de 90 % de tintes industriales en función del pH. Hay una interacción electrostática entre los grupos hidroxilos OH⁻ cargados negativamente de fibras de celulosa de *E. crassipes* junto con el anión NH⁺ (III) del quitosano; el TiO₂ se une a este compuesto y forma una red quelante, aumentando la capacidad de intercambio catiónico (El-Zawahry, Abdelghaffar, Abdelghaffar, & Hassabo, 2016).

Una transformación de biomasa de *E. crassipes* muy utilizada es la creación de xantogenato de celulosa ((Cell-OCS₂)₂ Mg) desarrollada por Tan et al. (2008) y Deng et al. (2009). Este procedimiento consiste en tomar la biomasa seca y molida de *E. crassipes* y adicionar hidróxido de sodio (NaOH), creando biomasa alcalina; posteriormente se esterifica con disulfuro de carbono (CS₂) y finalmente se trata con sulfato de magnesio (MgSO₄) para preparar xantogenato de celulosa. Zhou et al. (2011) caracterizaron tres tipos de biomasa de xantogenato: *E. crassipes*, paja de colza y tallo de maíz; los autores concluyeron que *E. crassipes* tiene mayor cantidad de grupos hidroxilos (OH) y grupos carbonilos (C=O) que los otros dos compuestos vegetales después de la alcalinización con NaOH, elevando la adhesión de magnesio (Mg) y azufre (S), para obtener el xantogenato de celulosa. El Mg y el S₂ son los responsables del

(Ammar, Elhaes, Ibrahim, & Ibrahim, 2014; Yang, Chen, & Zhang, 2014).

An operational drawback with these treatments, both with the *E. crassipes* plant still alive and with the crushed biomass, is the waste, due to the high adsorption of heavy metals; for this reason, it is proposed to use this biomass in a biofuel production process.

***Eichhornia crassipes* as a bioethanol producing source**

The production of ethanol fuel from lignocellulosic waste has become an interesting alternative that could open up new markets for its revaluation (Benítez et al., 2010). In the production of bioethanol from lignocellulosic material, various physical, chemical and biological processes take place, such as size reduction, lignin removal, acid hydrolysis, fermentation and distillation (Riaño, 2010). *Eichhornia crassipes* meets the criteria for bioenergy production; it is permanent because there are large quantities of plant available, it is biodegradable and it has a high cellulose content (Chuang et al., 2011). Among the main drawbacks in ethanol production is the use of food for humans and animals as raw material (Abdel & Abdel, 2012; Hossain, Chowdhury, Yeasmin, & Hoq, 2010; Ríos, 2015; Zbed, Sahu, Boyce, & Faruq, 2016).

Magdum et al. (2012) performed an acid hydrolysis with *E. crassipes* and sulfuric acid (H_2SO_4); the hydrolyzed solution showed to be rich in hexose and pentoses, which were used directly as substrate for alcohol production by means of batch fermentation using *Pichia stipitis* Pignal. Hydrolysis with H_2SO_4 is the most effective pretreatment for the *E. crassipes* treatment (Pattra & Sittijunda, 2015).

Saccharomyces cerevisiae (Desm.) Meyen is the most widely used yeast for the production of bioethanol from sugars, product of the hydrolysis of *E. crassipes*, due to its high fermentation power (Kuldiloke, Eshtiaghi, Peeploy, & Amornrattanapong, 2010; Pattra & Sittijunda, 2015). This bioethanol production, from the hydrolyzed biomass of *E. crassipes*, has been carried out in bioreactors designed and built with the adjusted parameters (Kuldiloke et al., 2010; Lee, Park, Cho, & Kim, 2018; Thi et al., 2017). In one year, from one hectare of *E. crassipes*, with a production of approximately 80 t, it is possible to produce 265 L of ethanol through a large-scale fermentation process (Bronzato, 2016).

***Eichhornia crassipes* as a biohydrogen producer**

Hydrogen has transcendental properties as a biofuel, as it is colorless, odorless, tasteless and pollutant-free; it is used in several chemical process industries as its only product is water, and it does not emit pollutants such as methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2) into

intercambio catiónico con el plomo (II), removiendo 90 % con concentraciones iniciales de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Tan et al., 2008).

La biomasa de *E. crassipes* se ha unido a otro tipo de polisacárido como el quitosano, creando microesferas con solución de tripolifosfato de sodio (TPP). Las fibras de la celulosa de *E. crassipes* se incrustaron en la matriz de quitosano. En el tratamiento experimental, estas esferas removieron cerca de 95 % de plomo (II) con concentración inicial de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. El plomo quedó adherido en el compuesto gelificado de celulosa de *E. crassipes* y quitosano a través de un intercambio catiónico de quimisorción (Ammar, Elhaes, Ibrahim, & Ibrahim, 2014; Yang, Chen, & Zhang, 2014).

Un problema operativo de estos tratamientos, tanto con la planta de *E. crassipes* aún viva y con la biomasa triturada, son los desechos, debido a la alta adsorción de metales pesados; por este motivo se propone utilizar esta biomasa en un proceso de producción de biocombustibles.

***Eichhornia crassipes* como fuente productora de bioetanol**

La producción del combustible etanol, a partir de residuos lignocelulósicos, se ha convertido en una alternativa interesante, que podría abrir nuevos mercados para su revalorización (Benítez et al., 2010). En la producción de bioetanol, a partir de material lignocelulósico, tienen lugar varios procesos físicos, químicos y biológicos como la reducción de tamaño, remoción de lignina, hidrólisis ácida, fermentación y destilación (Riaño, 2010). *Eichhornia crassipes* cumple los criterios para la producción de bioenergía; es permanente debido a que hay grandes cantidades de planta disponible, es biodegradable y tiene contenido alto de celulosa (Chuang et al., 2011). Entre los principales inconvenientes a la hora de producir etanol, se encuentra el uso de alimentos para humanos y animales como materia prima (Abdel & Abdel, 2012; Hossain, Chowdhury, Yeasmin, & Hoq, 2010; Ríos, 2015; Zbed, Sahu, Boyce, & Faruq, 2016).

Magdum et al. (2012) realizaron una hidrólisis ácida con *E. crassipes* y ácido sulfúrico (H_2SO_4); la solución hidrolizada mostró ser rica en hexosas y pentosas, las cuales fueron utilizadas directamente como sustrato para la producción de alcohol por medio de fermentación *batch* usando *Pichia stipitis* Pignal. La hidrólisis con H_2SO_4 es el pretratamiento más eficaz para el tratamiento de *E. crassipes* (Pattra & Sittijunda, 2015).

Saccharomyces cerevisiae (Desm.) Meyen es la levadura más utilizada para la producción de bioetanol a partir de los azúcares, producto de la hidrólisis de *E. crassipes*, debido a su alto poder de fermentación (Kuldiloke,

the environment (Khan et al., 2017; Nagarajan et al., 2016; Rahman et al., 2016). Hydrogen production, through dark fermentation, is a promising path; it is obtained from carbohydrate-rich raw materials, such as wastewater, food waste and agricultural residues (Dessi, Lakaniemi, & Lens, 2017; Khan et al., 2017; Mechery, Biji, Thomas, & Syllas, 2017; Ri et al., 2017; Roy, Ghosh, & Sarkar, 2016), in the absence of light with the combined action of anaerobic bacteria. The generation of biohydrogen through this technique is a complex process involving microbial groups that grow in darkness, mainly of the genera *Enterobacter*, *Bacillus* and *Clostridium* (Chuang et al., 2011; García-Depraect, Gómez-Romero, León-Becerril, & López-López, 2017; Park et al., 2017). Biohydrogen production by anaerobic fermentation is well known to be the most suitable, due to its potential for direct utilization of wastewater and organic waste (Ganguly et al., 2012; Nagarajan et al., 2016; Rahman et al., 2016; Park et al., 2017).

Results and discussion

Design of an integrated phytoremediation and energy production system

The proposal presented is a design case study, generated from the review of the state of the art, which can be adjusted to industrial scale conditions. This design includes a phytoremediation system, a bioreactor to generate hydrolysis, a bioreactor to generate bioethanol and, finally, a bioreactor to generate hydrogen.

Set up of the experimental phytoremediation model

The dimensions of the experimental phytoremediation model are 4 m long, 1.5 m high and 1.5 m wide, where 100 L of water will be treated per day. This design allows for the placement of 20 plants that together weigh approximately 1.8 kg. For the treatment of 100 L, 20 *E. crassipes* plants are proposed; approximately 5 L of water are treated by each plant. The model is based on what is indicated by Chen et al. (2016), Mascarenhas and Junior (2016), Mello et al. (2017) and Wu et al. (2015). This article proposes plastic systems for the treatment of domestic and industrial wastewater.

Design of the hydrolysis process

The experimental process for the hydrolysis of the *E. crassipes* biomass requires 1 kg dry weight of the biomass used in the phytoremediation process. The hydrolysate bioreactor is made of glass (5 L), has a lid for gas release and sampling for pH and temperature measurement, and a heating magnetic stirrer (120 rpm at 60 °C). This design was based on and adapted from studies by Kuldiloke et al. (2010) and Lee et al. (2018); the bioreactor is simple, economical and easy to install (Thi et al., 2017).

Eshtiaghi, Peeploy, & Amornrattanapong, 2010; Pattra & Sittijunda, 2015). Esta producción de bioetanol, a partir de la biomasa hidrolizada de *E. crassipes*, se ha realizado en biorreactores diseñados y construidos con los parámetros ajustados (Kuldiloke et al., 2010; Lee, Park, Cho, & Kim, 2018; Thi et al., 2017). En un año, a partir de una hectárea de *E. crassipes* con producción de 80 t aproximadamente, es posible producir 265 L de etanol a través de un proceso de fermentación a gran escala (Bronzato, 2016).

Eichhornia crassipes como productor de biohidrógeno

El hidrógeno tiene propiedades trascendentales como biocombustible, ya que es incoloro, inodoro e insípido; es limpio de contaminantes; se utiliza en varias industrias de procesos químicos, ya que su único producto es el agua; y no emite contaminantes como el metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) al medio ambiente (Khan et al., 2017; Nagarajan et al., 2016; Rahman et al., 2016). La producción de hidrógeno, a través de la fermentación oscura, es un camino prometedor; esta se obtiene a partir de materias primas ricas en hidratos de carbono, tales como aguas residuales, residuos de alimentos y residuos agrícolas (Dessi, Lakaniemi, & Lens, 2017; Khan et al., 2017; Mechery, Biji, Thomas, & Syllas, 2017; Ri et al., 2017; Roy, Ghosh, & Sarkar, 2016) en ausencia de luz con la acción combinada de bacterias anaeróbicas. La generación de biohidrógeno a través de esta técnica es un proceso complejo en el que intervienen grupos microbianos que crecen en oscuridad, principalmente de los géneros *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium* (Chuang et al., 2011; García-Depraect, Gómez-Romero, León-Becerril, & López-López, 2017; Park et al., 2017). La producción de biohidrógeno mediante fermentación anaeróbica es bien conocida por ser la más adecuada, debido a su potencial de utilización directa de aguas residuales y restos orgánicos (Ganguly et al., 2012; Nagarajan et al., 2016; Rahman et al., 2016; Park et al., 2017).

Resultados y discusión

Diseño de un sistema integrado de fitorremediación y producción de energía

La propuesta presentada es un estudio de caso de diseño, generado a partir de la revisión del estado del arte, que se puede ajustar a las condiciones de escala industrial. Este diseño abarca un sistema de fitorremediación, un biorreactor para generar hidrólisis, un biorreactor para la generación de bioetanol y, por último, un biorreactor para generar hidrógeno.

Montaje del modelo experimental de fitorremediación

Las dimensiones del modelo experimental de fitorremediación son 4 m de largo, 1.5 m de alto y

The hydrolysate bioreactor contains 1 kg of dried *E. crassipes* biomass mixed with distilled water. Samples react in 1 % (w/v) NaOH at 60 °C for 12 h, then washed with tap water until the pH value of the water is reached. Subsequently, 3 % H₂SO₄ (v/v) is added at 60 °C for 12 h; samples are washed with tap water until they reach the pH value of the water. The content of reducing sugars is determined with the dinitro salicylic acid (DNS) method (Peña & Arango, 2009) which indirectly quantifies substrate consumption. Finally, 4 L of *E. crassipes* hydrolysate solution would be obtained for bioethanol and biohydrogen production.

Set up of the experimental bioethanol production model

The proposed fermentation bioreactor is made of glass (5 L), with a lid for gas release and sampling for pH and temperature measurement, and a heating magnetic stirrer (120 rpm at 60 °C). The yeast *S. cerevisiae* is used as a fermenting inoculum of the *E. crassipes* hydrolysate. In the bioreactor, 400 g of the hydrolysate are mixed with distilled water and 180 g of the inoculum of *S. cerevisiae* (commercial Lesaffre); the initial pH is adjusted to 5.5 with NaOH. The bioreactor is hermetically sealed with rubber septa and aluminum stoppers for 12 h. This bioreactor was adapted from Lee et al. (2018) and Thi et al. (2017). One proposal in this article is the use of recycled glass jars to reduce implementation costs. During fermentation of biomass hydrolysis, tests should be performed every two hours to determine ethanol percentages by gas chromatography.

Set up of the experimental biohydrogen production model

The dark fermentation bioreactor is made of glass (5 L) and has a lid for gas release and sampling for pH and temperature measurement, and a heating magnetic stirrer (120 rpm at 60 °C). The bioreactor is hermetically sealed with rubber septa and aluminum stoppers; subsequently, the orifices are then purged with nitrogen for 5 min to ensure the anaerobic condition; this bioreactor was adapted from Ri et al. (2017), Nagarajan et al. (2016) and Rahman et al. (2016).

One proposal of this article is to take as inoculum the biosolids generated in the El Salitre wastewater treatment plant (Wtp) in the city of Bogota. These biosolids are obtained after digestion (20 days of treatment) and are used due to the suitability of their bacterial profile (Ri et al., 2011). In the bioreactor, 400 g of the hydrolysate are mixed with distilled water and 180 g of the inoculum (biosolid); the initial pH is adjusted to 5.5 with NaOH.

1.5 m de ancho, donde se tratarán 100 L de agua por día. En este diseño se pueden colocar 20 plantas que en conjunto pesan aproximadamente 1.8 kg. Para el tratamiento de 100 L se proponen 20 plantas de *E. crassipes*; aproximadamente, se tratan 5 L de agua por cada planta. El modelo se basa en lo indicado por Chen et al. (2016), Mascarenhas y Junior (2016), Mello et al. (2017) y Wu et al. (2015). En este artículo se proponen unos sistemas de plástico para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.

Diseño del proceso de hidrólisis

El proceso experimental de la hidrólisis de la biomasa de *E. crassipes* requiere 1 kg en peso seco de la biomasa utilizada en el proceso de fitorremediación. El biorreactor del hidrolizado es de vidrio (5 L), tiene una tapa para el desprendimiento de gases y toma de muestras para la medición de pH y temperatura, y un calentador de agitación magnética (120 rpm a 60 °C). Este diseño se basó y se adaptó de los estudios de Kuldiloke et al. (2010) y Lee et al. (2018); el biorreactor es sencillo, económico y fácil de instalar (Thi et al., 2017).

El biorreactor del hidrolizado lleva 1 kg de biomasa seca de *E. crassipes* mezclada con agua destilada. Las muestras se hacen reaccionar en 1 % (p/v) de NaOH a 60 °C durante 12 h, después se lavan con agua del grifo hasta alcanzar el valor de pH del agua. Posteriormente se agrega H₂SO₄ al 3 % (v/v) a 60 °C durante 12 h; las muestras se lavan con agua del grifo hasta que alcancen el valor de pH del agua. El contenido de azúcares reductores se determina con el método del ácido dinitro salicílico (DNS) (Peña & Arango, 2009) que cuantifica el consumo de sustrato de forma indirecta. Finalmente, se obtendrían 4 L de solución de hidrolizado de *E. crassipes* para la producción de bioetanol y biohidrógeno.

Montaje del modelo experimental de producción de bioetanol

El biorreactor de fermentación propuesto es de vidrio (5 L), con una tapa para el desprendimiento de gases y toma de muestras para la medición de pH y temperatura, y un calentador de agitación magnética (120 rpm a 60 °C). La levadura *S. cerevisiae* se utiliza como inóculo fermentador del hidrolizado de *E. crassipes*. En el biorreactor se mezclan 400 g del hidrolizado con agua destilada y 180 g del inóculo de *S. cerevisiae* (Lesaffre comercial); el pH inicial se ajusta a 5.5 con NaOH. El biorreactor se sella herméticamente con septos de goma y tapones de aluminio durante 12 h. Este biorreactor se adaptó de Lee et al. (2018) y Thi et al. (2017). Una propuesta en este artículo es la utilización de frascos de vidrio reciclado para la disminución de costos de implementación. Durante la fermentación

At two-hour intervals, the volume of biogas should be measured by plunger displacement, after which the hydrogen gas should be determined by gas chromatography using a thermal conductivity detector (TCD) in a GC-Agilent 7890 chromatograph (Chuang et al., 2011; García et al., 2017).

Figure 1 shows the proposed design to produce bioenergy from *E. crassipes* biomass, obtained in a phytoremediation process, and the hydrolysis and bioethanol and biohydrogen production bioreactors.

de la hidrólisis de la biomasa se deben realizar pruebas cada dos horas para determinar los porcentajes de etanol mediante cromatografía de gases.

Montaje del modelo experimental de producción de biohidrógeno

El biorreactor de fermentación oscura es de vidrio (5 L) y tiene una tapa para el desprendimiento de gases y toma de muestras para la medición de pH y temperatura, y un calentador de agitación magnética (120 rpm a 60 °C).

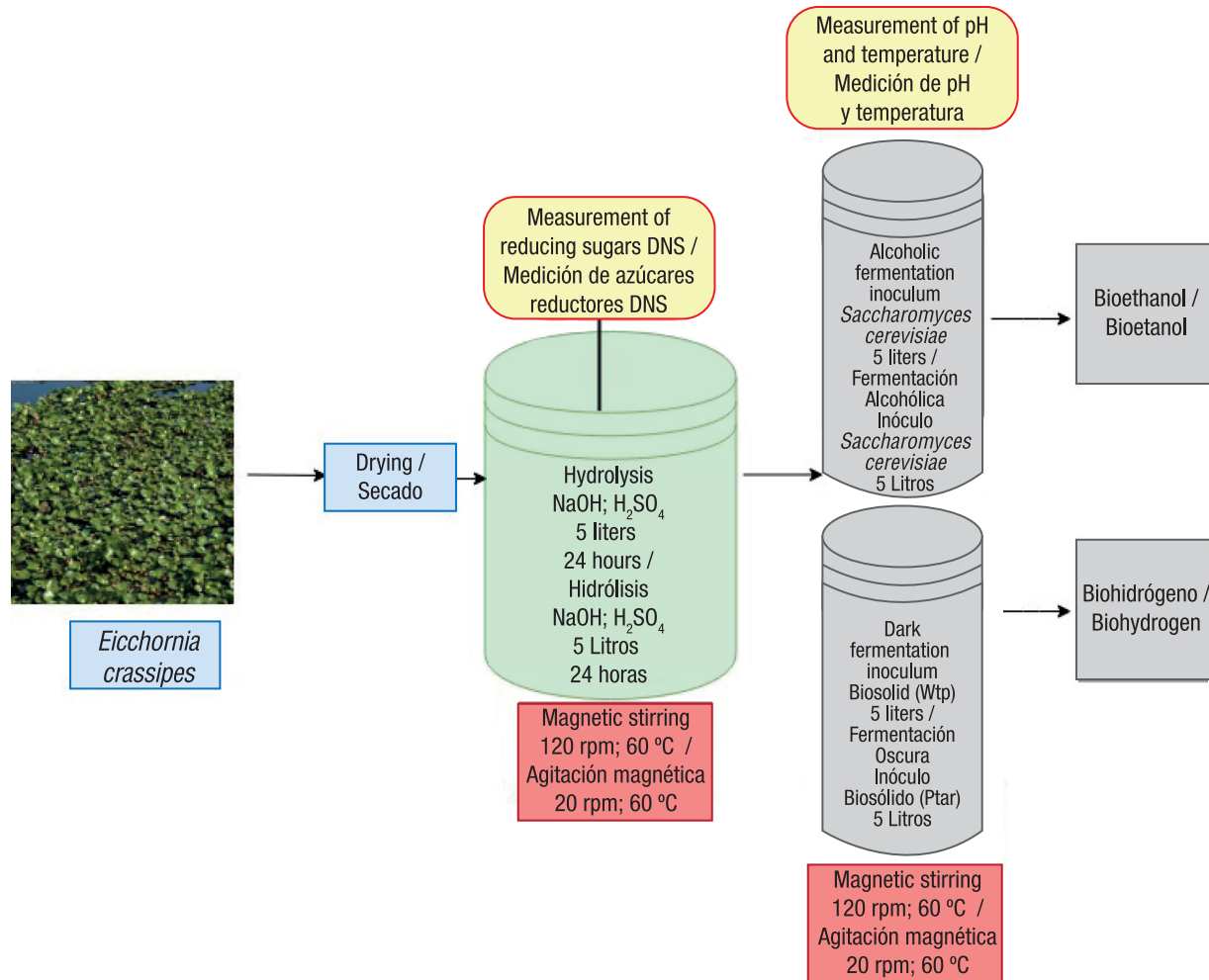


Figure 1. Design of a process for phytoremediation and production of biofuels (bioethanol and biohydrogen) from *Eichhornia crassipes* (adapted from Carreño, 2016b; Chen et al., 2016; Kuldiloke et al., 2010; Lee et al., 2018; Mascarenhas & Junior, 2016; Mello et al., 2017; Nagarajan et al., 2016; Rahman et al., 2016; Ri et al., 2017; Thi et al., 2017). DNS: dinitro salicylic acid; Wtp: wastewater treatment plant.

Figura 1. Diseño de un proceso de fitorremediación y producción de biocombustibles (bioetanol y biohidrógeno) a partir de *Eichhornia crassipes* (adaptado de Carreño, 2016b; Chen et al., 2016; Kuldiloke et al., 2010; Lee et al., 2018; Mascarenhas & Junior, 2016; Mello et al., 2017; Nagarajan et al., 2016; Rahman et al., 2016; Ri et al., 2017; Thi et al., 2017). DNS: ácido dinitro salicílico; PtAr: planta de tratamiento de aguas residuales.

Conclusions

The integrated design presented in this paper consists of a phytoremediation process using *Eichhornia crassipes* biomass (living and dead), a biofuel production process composed of the hydrolysis bioreactor along with the bioreactors for bioethanol and biohydrogen production. In phytoremediation, the aquatic plant *E. crassipes* is an important agent that adsorbs heavy metals and nutrients due to the high cellulose content in its biomass. This biomass used in the phytoremediation process can be implemented in the production of biofuels. The bioreactors proposed for bioethanol and biohydrogen production are inexpensive and easy to implement. It is feasible to create and build a large-scale bioethanol and biohydrogen production system from *E. crassipes* biomass (loaded or not with heavy metals) and not waste the biomass of this plant as is currently the case.

End of English version

References / Referencias

- Abdelraheem, W. H., Komy, Z. R., & Ismail, N. M. (2017). Electrochemical determination of Cu²⁺ complexation in the extract of *E. crassipes* by anodic stripping voltammetry. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(1), S1105–S1110. doi: 10.1016/j.arabjc.2013.01.019
- Adanikin, B. A., Ogunwande, G. A., & Adesanwo, O. O. (2017). Evaluation and kinetics of biogas yield from morning glory (*Ipomoea aquatica*) co-digested with water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Ecological Engineering*, 98, 98–104. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.067
- Abdel-Fattah, A. F., & Abdel-Naby, M. A. (2012). Pretreatment and enzymic saccharification of water hyacinth cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 87(3), 2109–2113. doi: 10.1016/j.carbpol.2011.10.033
- Ammar, N. S., Elhaes, H., Ibrahim, H. S., & Ibrahim, M. A. (2014). A novel structure for removal of pollutants from wastewater. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 121, 216–223. doi: 10.1016/j.saa.2013.10.063
- Balasubramanian, D., Arunachalam, K., Das, A. K., & Arunachalam, A. (2012). Decomposition and nutrient release of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. under different trophic conditions in wetlands of eastern Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 44, 11–112. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.03.002
- Benítez, L. T., Tovar, C. T., Ortiz, Á. V., Dunoyer, A. T., Alvear, M., Castillo, C., ... Madariaga, N. (2010). Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña. *Revista Educación en Ingeniería*, 5(10), 120–125. doi: 10.26507/rei.v5n10.104

El biorreactor se sella herméticamente con septos de goma y tapones de aluminio; posteriormente, los orificios se purgan con nitrógeno durante 5 min para asegurar la condición anaeróbica; este biorreactor se adaptó de Ri et al. (2017), Nagarajan et al. (2016) y Rahman et al. (2016).

Una propuesta de este artículo es tomar como inóculo, el biosólido generado en la planta de tratamiento de aguas residuales (Ptar) El Salitre de la ciudad de Bogotá. Estos biosólidos se obtienen después de su digestión (20 días de tratamiento) y se utilizan debido a la idoneidad de su perfil bacteriano (Ri et al., 2011). En el biorreactor se mezclan 400 g del hidrolizado con agua destilada y 180 g del inóculo (biosólido); el pH inicial se ajusta a 5.5 con NaOH.

En intervalos de dos horas, el volumen de biogás se debe medir por el desplazamiento del émbolo, seguido a ello, el gas hidrógeno se debe determinar por cromatografía de gases utilizando un detector de conductividad térmica (TCD) en un cromatógrafo marca GC-Agilent 7890 (Chuang et al., 2011; García et al., 2017).

En la Figura 1 se muestra el diseño propuesto de producción de bioenergía a partir de la biomasa de *E. crassipes*, obtenida en un proceso de fitorremediación, y los biorreactores de hidrólisis y de producción de bioetanol y biohidrógeno.

Conclusiones

El diseño integral generado en el presente artículo consta de un proceso de fitorremediación utilizando la biomasa de *Eichhornia crassipes* (viva y muerta), un proceso de producción de biocombustibles compuesto por el biorreactor de la hidrólisis junto con los biorreactores para la producción de bioetanol y biohidrógeno. En la fitorremediación, la planta acuática *E. crassipes* es un agente importante que adsorbe metales pesados y nutrientes, debido al contenido alto de celulosa en su biomasa. Esta biomasa utilizada en el proceso de fitorremediación puede emplearse en la producción de biocombustibles. Los biorreactores propuestos para la producción de bioetanol y biohidrógeno son económicos y fáciles de implementar. Es viable crear y construir un sistema de producción de bioetanol y biohidrógeno, a gran escala, a partir de biomasa de *E. crassipes* (cargada o no con metales pesados) y no desperdiciar la biomasa de esta planta como se hace en la actualidad.

Fin de la versión en español

- Borker, A. R., Mane, A. V., Saratale, G. D., & Pathade, G. R. (2013). Phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* for the treatment of cadmium in relation with biochemical and water parameters. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25(6), 443–456. doi: 10.9755/ejfa.v25i6.13970
- Bronzato, G. R. F. (2016). Investigación da biomassa de *Eichhornia crassipes* (aguapé) para a obtenção de etanol de segunda geração como um processo mitigatório da poluição aquática. Retrieved from https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/141985/bronzoato_grf_me_bot.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Carreño, U. (2016a). Diseño y evaluación de un biosistema de tratamiento a escala piloto de aguas de curtiembres a través de la *Eichhornia crassipes*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(2), 74–82. doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.52271
- Carreño, U. (2016b). Diseño, construcción y desarrollo de un filtro biológico para las aguas contaminadas con cromo: estudio de caso. *Ingenio Magno*, 7(1), 22–30. Retrieved from <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/viewFile/1164/1128>
- Chen, Z. J., Tian, Y. H., Zhang, Y., Song, B. R., Li, H. C., & Chen, Z. H. (2016). Effects of root organic exudates on rhizosphere microbes and nutrient removal in the constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 92, 243–250. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.04.001
- Chuang, Y. S., Lay, C. H., Sen, B., Chen, C. C., Gopalakrishnan, K., Wu, J. H., & Lin, C. Y. (2011). Biohydrogen and biomethane from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) fermentation: effects of substrate concentration and incubation temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(21), 14195–14203. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.188
- Deng, L., Geng, M., Zhu, D., Zhou, W., Langdon, A., Wu, H., & Wang, Y. (2012). Effect of chemical and biological degumming on the adsorption of heavy metal by cellulose xanthogenates prepared from *Eichhornia crassipes*. *Bioresource Technology*, 107, 41–45. doi: 10.1016/j.biortech.2011.12.023
- Dessi, P., Lakaniemi, A. M., & Lens, P. N. (2017). Biohydrogen production from xylose by fresh and digested activated sludge at 37, 55 and 70 °C. *Water Research*, 115, 120–129. doi: 10.1016/j.watres.2017.02.063
- El-Zawahry, M. M., Abdelghaffar, F., Abdelghaffar, R. A., & Hassabo, A. G. (2016). Equilibrium and kinetic models on the adsorption of Reactive Black 5 from aqueous solution using *Eichhornia crassipes*/chitosan composite. *Carbohydrate Polymers*, 136, 507–515. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.09.071
- Ganguly, A., Chatterjee, P. K., & Dey, A. (2012). Studies on ethanol production from water hyacinth—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 966–972. doi: 10.1016/j.rser.2011.09.018
- García-Depraect, O., Gómez-Romero, J., León-Becerril, E., & López-López, A. (2017). A novel biohydrogen production process: Co-digestion of vinasse and nejayote as complex raw substrates using a robust inoculum. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(9), 5820–5831. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.204
- Gupta, A., & Balomajumder, C. (2015). Removal of Cr (VI) and phenol using water hyacinth from single and binary solution in the artificial photosynthesis chamber. *Journal of Water Process Engineering*, 7, 74–82. doi: 10.1016/j.jwpe.2015.05.008
- Hadad, H. R., Maine, M. A., Mufarrege, M. M., Del Sastre, M. V., & Di Luca, G. A. (2011). Bioaccumulation kinetics and toxic effects of Cr, Ni and Zn on *Eichhornia crassipes*. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 1016–1022. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.04.044
- Hokkanen, S., Repo, E., & Sillanpää, M. (2013). Removal of heavy metals from aqueous solutions by succinic anhydride modified mercerized nanocellulose. *Chemical Engineering Journal*, 223, 40–47. doi: 10.1016/j.cej.2013.02.054
- Hossain, R., Chowdhury, M. K., Yeasmin, S., & Hoq, M. M. (2010). Production of ethanol using yeast isolates on water hyacinth and azolla. *Bangladesh Journal of Microbiology*, 27(2), 56–60. doi: 10.3329/bjm.v27i2.9173
- Khan, M. A., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, Y., Zhang, X., Guo, J., & Wang, J. (2017). Biohydrogen production from anaerobic digestion and its potential as renewable energy. *Renewable Energy*, 129(B), 754–768. doi: 10.1016/j.renene.2017.04.029
- Kuldiloke, J., Eshtiaghi, M. N., Peeploy, P., & Amornrattanapong, P. (2010). Bioconversion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) to bioethanol. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PH2013000169>
- Kumar, A., Singh, L. K., & Ghosh, S. (2009). Bioconversion of lignocellulosic fraction of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to ethanol by *Pichia stipitis*. *Bioresource Technology*, 100(13), 3293–3297. doi: 10.1016/j.biortech.2009.02.023
- Lay, C. H., Sen, B., Chen, C. C., Wu, J. H., Lee, S. C., & Lin, C. Y. (2013). Co-fermentation of water hyacinth and beverage wastewater in powder and pellet form for hydrogen production. *Bioresource Technology*, 135, 610–615. doi: 10.1016/j.biortech.2012.06.094
- Lee, J., Park, K. Y., Cho, J., & Kim, J. Y. (2018). Releasing characteristics and fate of heavy metals from phytoremediation crop residues during anaerobic digestion. *Chemosphere*, 191, 520–526. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.072
- Lin, S., Yang, H., Na, Z., & Lin, K. (2018). A novel biodegradable arsenic adsorbent by immobilization of iron oxyhydroxide (FeOOH) on the root powder of long-root *Eichhornia crassipes*. *Chemosphere*, 192, 258–266. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.163
- Magdum, S., More, S., & Nadaf, A. (2012). Biochemical conversion of acid-pretreated water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) to alcohol using *Pichia stipitis* NCIM3497. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 3(2), 585–590. Retrieved from https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2200481

- Martínez, C., Torres, L. M., & de la Cruz, R. F. G. (2013). Evaluación de la cinética de adsorción de Zn^{2+} y Cd^{2+} a partir de soluciones unitarias y binarias por raíces de *Eichhornia crassipes* y *Typha latifolia*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(2), 1–14. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4393058>
- Mahunon, S. E. R., Aina, M. P., Akowanou, A. V. O., Kouassi, E. K., Yao, B. K., Adouby, K., & Drogui, P. (2018). Optimization process of organic matter removal from wastewater by using *Eichhornia crassipes*. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(29), 1–8. doi: 10.1007/s11356-018-2771-y
- Mascarenhas, L. C., & Júnior, A. V. M. (2016). Experimental use of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) wetland for treating flowing waters in an urban park in Brazil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 20(2), 18–23. doi: 10.14210/bjast.v20n2.7259
- Mechery, J., Biji, B., Thomas, D. M., & Syllas, V. P. (2017). Biohydrogen production by locally isolated facultative bacterial species using the biomass of *Eichhornia crassipes*: effect of acid and alkali treatment. *Energy, Ecology and Environment*, 2(5), 350–359. doi: 10.1007/s40974-017-0069-4
- Mello, D., Carvalho, K. Q., Passig, F. H., Freire, F. B., Borges, A. C., Lima, M. X., & Marcelino, G. R. (2017). Nutrient and organic matter removal from low strength sewage treated with constructed wetlands. *Environmental Technology*, 40(1), 1–8. doi: 10.1080/09593330.2017.1377291
- Mishima, D., Kuniki, M., Sei, K., Soda, S., Ike, M., & Fujita, M. (2008). Ethanol production from candidate energy crops: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *Bioreosurce Technology*, 99(7), 2495–2500. doi: 10.1016/j.biortech.2007.04.056
- Mishra, V. K., & Tripathi, B. D. (2009). Accumulation of chromium and zinc from aqueous solutions using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 1059–1063. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.020
- Nagarajan, D., Lee, D. J., Kondo, A., & Chang, J. S. (2017). Recent insights into biohydrogen production by microalgae—from biophotolysis to dark fermentation. *Bioresource Technology*, 227, 373–387. doi: 10.1016/j.biortech.2016.12.104
- Park, J. H., Anburajan, P., Kumar, G., Park, H. D., & Kim, S. H. (2017). Biohydrogen production integrated with an external dynamic membrane: A novel approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(45), 27543–27549. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.145
- Patra, S., & Sittijunda, S. (2015). Optimization of factors affecting acid hydrolysis of water hyacinth stem (*Eichhornia crassipes*) for bio-hydrogen production. *Energy Procedia*, 79, 833–837. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.574
- Peña, C., & Arango, R. (2009). Evaluación de la producción de etanol utilizando cepas recombinantes de *Saccharomyces cerevisiae* a partir de melaza de caña de azúcar. *Dyna*, 76(159), 153–161. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/13051/13746>
- Rahman, S. N. A., Masdar, M. S., Rosli, M. I., Majlan, E. H., Husaini, T., Kamarudin, S. K., & Daud, W. R. W. (2016). Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 137–162. doi: 10.1016/j.rser.2016.07.047
- Rani, N., Singh, B., & Shimrah, T. (2017). Chromium (VI) removal from aqueous solutions using *Eichhornia* as an adsorbent. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7(4), 461–467. doi: 10.2166/wrd.2016.094
- Ri, P. C., Ren, N. Q., Ding, J., Kim, J. S., & Guo, W. Q. (2017). CFD optimization of horizontal continuous stirred-tank (HCSTR) reactor for bio-hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 9630–9640. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.035
- Riaño, A. M. S. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 1(5), 61–91. Retrieved from <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/58/58>
- Ríos, L. A. (2015). Producción de bioetanol a partir de jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) respecto a otros materiales lignocelulósicos. *Revista Agunkuya*, 2(1), 42–62. Retrieved from <http://revia.areandina.edu.co/ojs/index.php/Cc/article/view/302/331>
- Roy, K., Ghosh, C. K., & Sarkar, C. K. (2016). Rapid detection of hazardous H_2O_2 by biogenic copper nanoparticles synthesized using *Eichhornia crassipes* extract. *Microsystem Technologies*, 25(5), 1699–1703. doi: 10.1007/s00542-017-3480-z
- Saraswat, S., & Rai, J. P. N. (2010). Heavy metal adsorption from aqueous solution using *Eichhornia crassipes* dead biomass. *International Journal of Mineral Processing*, 94(3-4), 203–206. doi: 10.1016/j.minpro.2010.02.006
- Sarkar, M., Rahman, A. K. M. L., & Bhoumik, N. C. (2017). Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder. *Water Resources and Industry*, 17, 1–6. doi: 10.1016/j.wri.2016.12.003
- Sayago, U. F. C. (2019). Design of a sustainable development process between phytoremediation and production of bioethanol with *Eichhornia crassipes*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4), 221. doi: 10.1007/s10661-019-7328-0
- Swain, G., Adhikari, S., & Mohanty, P. (2014). Phytoremediation of copper and cadmium from water using water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 2(1), 1–7. doi: 10.14355/ijast.2014.0301.01
- Tan, L., Zhu, D., Zhou, W., Mi, W., Ma, L., & He, W. (2008). Preferring cellulose of *Eichhornia crassipes* to prepare xanthogenate to other plant materials and its adsorption properties on copper. *Bioresource Technology*, 99(10), 4460–4466.
- Thi, B. T. N., Ong, L. K., Thi, D. T. N., & Ju, Y. H. (2017). Effect of subcritical water pretreatment on cellulose recovery

- of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 55–61. doi: 10.1016/j.jtice.2016.12.028
- Trujillo, F., Rial, A., Canon, S., Rojas, D. M., & Sierra, F. (2010). Diagnóstico sobre el estado de conocimiento y conservación de la flora acuática y mamíferos asociados a los humedales de las cuencas Orinoco, Magdalena y Cauca. Retrieved from <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/31174/10-10-011-024.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vásquez, B. (2012). El tratamiento de los desechos líquidos de la zona de tintura en las flores para la exportación con *Eichhornia crassipes* (Buchón de Agua). *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 23–27. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/695/69510204.pdf>
- Wei, Y., Fang, Z., Zheng, L., & Tsang, E. P. (2017). Biosynthesized iron nanoparticles in aqueous extracts of *Eichhornia crassipes* and its mechanism in the hexavalent chromium removal. *Applied Surface Science*, 399, 322–329. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.12.090
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., ...Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594–601. doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.068
- Yang, X., Chen, S., & Zhang, R. (2014). Utilization of two invasive free-floating aquatic plants (*Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes*) as sorbents for oil removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1), 781–786. doi: 10.1007/s11356-013-2232-6
- Yi, Z. J., Yao, J., Chen, H. L., Wang, F., Yuan, Z. M., & Liu, X. (2016). Uranium biosorption from aqueous solution onto *Eichhornia crassipes*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 154, 43–51. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.01.012
- Zabed, H., Sahu, J. N., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2016). Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 751–774. doi: 10.1016/j.rser.2016.08.038
- Zhou, W., Zhu, D., Langdon, A., Li, L., Liao, S., & Tan, L. (2009). The structure characterization of cellulose xanthogenate derived from the straw of *Eichhornia crassipes*. *Bioresource Technology*, 100(21), 5366–5369. doi: 10.1016/j.biortech.2009.05.066