

# Influence of the geographical area and morphological part of the water hyacinth on its chemical composition

## Influencia de la zona geográfica y fracción del lirio acuático en su composición química

Xochitl Tovar-Jiménez<sup>1</sup>; Ernesto Favela-Torres<sup>2</sup>; Tania Lorena Volke-Sepúlveda<sup>2</sup>; Erika Escalante-Espinosa<sup>3</sup>; Ildefonso Jesús Díaz-Ramírez<sup>3</sup>; Jesús Antonio Córdova-López<sup>4</sup>; Alejandro Téllez-Jurado<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Biotecnología. Carretera Pachuca-Ciudad Sahagún km 20, Zempoala, Hidalgo, C. P. 43830, MÉXICO.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Biotecnología. Avenida San Rafael Atlixco núm. 186, Colonia Vicentina, Ciudad de México, C. P. 09340, MÉXICO.

<sup>3</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas. Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, Villahermosa, Tabasco, C. P. 86039, MÉXICO.

<sup>4</sup>Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Blvd. Marcelino García Barragán núm. 1421, Guadalajara, Jalisco, C. P. 44430, MÉXICO.

\*Corresponding author: alito@upp.edu.mx, tel. (+52) 771 2206228

### Abstract

**Introduction:** The water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) is a tropical species that has characteristics with biotechnological potential; however, its chemical composition may vary depending on the geographical area and climatic conditions, which influences its end use.

**Objective:** To evaluate the effect of the collection site (Mexico City, Hidalgo, Jalisco and Tabasco) and morphological part of the *Eichhornia crassipes* plant on its chemical composition for biotechnological applications.

**Methodology:** The water hyacinth was sectioned into three parts and analyzed to establish a relationship according to the geographical collection area.

**Results:** Heterogeneous behavior was observed; both the geographical area and the plant section have a strong impact on the plant's chemical composition. The highest ash concentration was observed in the Tabasco samples (25 % in stalks and 16 % in leaves), while the lignin concentration was the highest in the Hidalgo samples (11 % in leaves and 6 % in stalks). On the other hand, solvent-extractable compounds were highest in the stalks of all samples, and water-extractable compounds were highest in the leaves. Holocellulose content was the constituent with the least variability.

**Study limitations:** Samples were collected from only three geographical areas of Mexico, so it is necessary to extend the study to more regions.

**Originality:** This is the first study carried out in Mexico that compares both the effect of the collection area and the section of the water hyacinth on its chemical composition.

**Conclusions:** For the processing of the water hyacinth, it is important to take into account the geographical area and the plant part.

**Keywords:** *Eichhornia crassipes*, holocellulose, lignin, solvent extractives, water extractives.

### Resumen

**Introducción:** El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es una especie tropical que posee características con potencial biotecnológico; sin embargo, su composición química puede variar en función de la zona geográfica y las condiciones climáticas, lo cual influye en su uso final.

**Objetivo:** Evaluar el efecto del lugar de colecta (Ciudad de México, Hidalgo, Jalisco y Tabasco) y la sección de la planta de *Eichhornia crassipes* sobre su composición química para aplicaciones biotecnológicas.

**Metodología:** El lirio acuático se seccionó en tres partes y se analizó para establecer una relación de acuerdo con la zona geográfica de colecta.

**Resultados:** Se observó un comportamiento heterogéneo; tanto la zona geográfica como la sección de la planta tienen un impacto fuerte en la composición de la planta. La mayor concentración de cenizas se observó en las muestras de Tabasco (25 % en tallos y 16 % en hojas), mientras que la concentración de lignina fue mayor en las muestras de Hidalgo (11 % en hojas y 6 % en tallos). Por su parte, los compuestos extraíbles en solventes fueron mayores en los tallos de todas las muestras, y los extraíbles en agua fueron superiores en las hojas. El contenido de holocelulosa fue el constituyente con menos variabilidad.

**Limitaciones del estudio:** Se colectaron muestras de solo tres zonas geográficas de México, por lo que se hace necesario extender el estudio a más regiones.

**Originalidad:** Es el primer estudio que se realiza en México que compara tanto el efecto de la zona de colecta como la fracción del lirio acuático sobre su composición química.

**Conclusiones:** Para el procesamiento del lirio acuático es importante tomar en cuenta la zona geográfica y la fracción de la planta.

**Palabras clave:** *Eichhornia crassipes*, holocelulosa, lignina, extraíbles en solventes, extraíbles en agua.

Please cite this article as follows (APA 6): Tovar-Jiménez, X., Favela-Torres, E., Volke-Sepúlveda, T. L., Escalante-Espinosa, E., Díaz-Ramírez, I. J., Córdova-López, J. A., & Téllez-Jurado, A. (2019). Influence of the geographical area and morphological part of the water hyacinth on its chemical composition. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(1), 39–52. doi: 10.5154/r.inagbi.2017.10.013

Received: October 20, 2017 / Accepted: November 15, 2018



Ingeniería Agrícola  
y Biosistemas

[www.chapingo.mx/revistas/inagbi](http://www.chapingo.mx/revistas/inagbi)

## Introduction

The water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) is a floating tropical species native to Brazil and, possibly, some Central American countries. It shows rapid growth and its distribution has been reported in several parts of the world, mainly between 40° North and South latitude, including South Africa and some countries such as India and the United States (Center, 1994; Hellmann, Byers, Bierwagen, & Dukes, 2008). In its natural habitat, the water hyacinth plays a very important role because it provides shelter and feeding grounds for fish, phytoplankton and zooplankton (Villamagna & Murphy, 2010), and it also has characteristics with biotechnological potential. However, in large quantities, this species has negative effects on the environment, human health and the economy, since it directly affects aquatic life in freshwater bodies (Epstein, 1998) and there is no biological control to prevent its excessive proliferation (Humphrey & Dube, 2018).

This plant is capable of developing in waters with high nutrient content, since it tolerates large variations in nutrients, pH and temperature (between 1 and 40 °C), although its optimum pH is between 6 and 8 (Wilson, Holst, & Rees, 2005). The growth rate of the water hyacinth increases when there are high levels of nitrogen dissolved in the water (Heard & Winterton, 2000), and it has been observed that salinity levels of 6 to 8 ‰ are lethal to the plant (Olivares & Colonnello, 2000).

One of the main problems generated by the water hyacinth is that, due to its high growth rate, it quickly covers the surfaces of water bodies, which prevents the passage of light and, consequently, blocks the photosynthetic processes of the aquatic flora, thereby reducing the dissolved oxygen in the water. In addition, its antagonistic role in the growth of other aquatic organisms, which reduces biological diversity, has been described (Brendonck et al., 2003). This species is capable of doubling its population in just five days, and has reached up to two million plants per hectare, weighing 200 to 400 t, which also generates serious problems in terms of navigation, recreation, irrigation and electricity generation (Epstein, 1998).

For the control of the water hyacinth, mathematical growth models have been developed, and it has been observed that under controlled conditions its growth follows a logistic behavior (Wilson et al., 2005); however, this has not been enough to avoid all the problems it causes in areas where it is considered an invasive species. Chemical methods (herbicides), biological control agents and physical removal are currently being used to control its growth (Harley, Julien, & Wright, 1996). It is a fact that only one method is inefficient, so it is necessary to use several removal

## Introducción

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es una especie tropical flotante originaria de Brasil y, posiblemente, de algunos países centroamericanos. Presenta un crecimiento rápido y se ha reportado su distribución en varias partes del mundo, principalmente entre los 40° de latitud norte y sur, incluyendo Sudáfrica y algunos países como India y Estados Unidos (Center, 1994; Hellmann, Byers, Bierwagen, & Dukes, 2008). En su hábitat natural, el lirio acuático juega un rol de gran importancia debido a que provee refugio y zonas de alimentación a los peces, fitoplancton y zooplacton (Villamagna & Murphy, 2010), además, posee características con potencial biotecnológico. Sin embargo, en grandes cantidades, esta especie presenta efectos negativos para el ambiente, la salud humana y la economía, ya que afecta directamente la vida acuática de los cuerpos de agua dulce (Epstein, 1998) y no existe un control biológico que evite su proliferación desmedida (Humphrey & Dube, 2018).

Esta planta es capaz de desarrollarse en aguas con alto contenido de nutrientes, ya que tolera grandes variaciones de nutrientes, pH y temperatura (entre 1 y 40 °C); aunque su pH óptimo es entre 6 y 8 (Wilson, Holst, & Rees, 2005). La velocidad de crecimiento del lirio acuático incrementa cuando hay niveles altos de nitrógeno disuelto en el agua (Heard & Winterton, 2000), y se ha observado que niveles de salinidad de 6 a 8 ‰ resultan letales para la planta (Olivares & Colonnello, 2000).

Uno de los principales problemas que genera el lirio acuático es que, debido a su alta velocidad de crecimiento, cubre rápidamente las superficies de los cuerpos de agua, lo que evita el paso de la luz y, por consiguiente, bloquea los procesos fotosintéticos de la flora acuática, reduciendo el oxígeno disuelto en el agua. Además, se ha descrito su papel antagónico en el crecimiento de otros organismos acuáticos, lo cual reduce la diversidad biológica (Brendonck et al., 2003). Esta especie es capaz de duplicar su población en solo cinco días, y se han llegado a contabilizar hasta dos millones de plantas por hectárea, con un peso de 200 a 400 t, por lo que además genera graves problemas de navegación, recreación, irrigación y generación de electricidad (Epstein, 1998).

Para el control del lirio acuático, se han desarrollado modelos matemáticos de crecimiento, y se ha observado que en condiciones controladas su crecimiento sigue un comportamiento logístico (Wilson et al., 2005); no obstante, esto no ha sido suficiente para evitar todos los problemas que causa en zonas donde se le considera como especie invasiva. Actualmente se utilizan métodos químicos (herbicidas), agentes de control biológico y

techniques simultaneously (Gutiérrez, Ruiz, Uribe, & Martínez, 2000), hence the importance of generating processing alternatives.

The water hyacinth contains between 92.8 and 95 % water, 4.2 to 6.1 % volatile compounds, 18.2 to 19 % cellulose, 48.7 to 50 % hemicellulose, 3.5 to 3.8 % lignin and 13 to 13.5 % crude protein (Nigam, 2002), so it can be used in a wide variety of processes (Malik, 2007); however, it is important to consider that these concentrations may vary depending on the geographical area and climatic conditions (Boyd & Vickers, 1971).

The most common uses of water hyacinth are for the production of ethanol (Aswathy et al., 2010; Guragain, Coninck, Husson, Durand, & Rakshit, 2011; Nigam, 2002), the production of fungal enzymes (Deshpande, Nair, & Khedkar, 2009; Pramanik, 2010; Wang, Liu, Ning, Liao, & Jia, 2017), the removal of heavy metals in water (Mahamadi & Nharingo, 2010; Mishra & Tripathi, 2009; Muramoto & Oki, 1983; Saraswat & Rai, 2010), phytoremediation (Jayaweera & Kasturiarachchi, 2004), biogas production (Kivaisi & Mtila, 1997) and as organic fertilizer (Khaket, Singh, Dhanda, Singh, & Singh, 2012).

Several researchers have analyzed the components of water hyacinth from different geographical areas. Lara-Serrano et al. (2016) studied samples from two geographical areas of Mexico (Durango and Guanajuato), finding differences in ash, holocellulose, and total extractives, while Lakshminarayana, Rao, Pantulu, and Thyagarajan (1984) observed differences in the composition of lipids in roots, stalks, leaves, and flowers. Therefore, in order to generate strategies for the use of this species, it is essential to know the influence that the geographical area and the parts of the plant have on its composition. In this sense, this research aimed to evaluate the effect of the collection area and the section of the *Eichhornia crassipes* plant on its chemical composition in four geographical zones of Mexico (Mexico City, Hidalgo, Jalisco and Tabasco), in order to determine the presence of the main components of this species for possible biotechnological applications.

## Materials and methods

### Collection of samples

Samples were collected in four areas from June to August 2016: San Antonio Dam (Huasca de Ocampo, Hidalgo: 20° 13' 40" NL and 98° 33' 45" WL), Cuernavaca Pier (Mexico City: 19° 16' 06" NL and 99° 06' 15" WL), Chapala Lake (Jalisco: 19° 16' 32" NL and 99° 06' 05" WL) and Villahermosa (Tabasco: 18° 10' 99" NL and 93° 10' 92" WL).

remoción física para controlar su crecimiento (Harley, Julien, & Wright, 1996). Es un hecho que un solo método es poco eficiente, por lo que se hace necesario el uso simultáneo de varias técnicas de eliminación (Gutiérrez, Ruiz, Uribe, & Martínez, 2000); de aquí la importancia de generar alternativas de procesamiento.

El lirio acuático contiene entre 92.8 y 95 % de agua, de 4.2 a 6.1 % de compuestos volátiles, de 18.2 a 19 % de celulosa, de 48.7 a 50 % de hemicelulosa, de 3.5 a 3.8 % de lignina y de 13 a 13.5 % de proteína cruda (Nigam, 2002), por lo que puede ser utilizado en una amplia variedad de procesos (Malik, 2007); sin embargo, es importante considerar que estas concentraciones pueden variar en función de la zona geográfica y las condiciones climáticas (Boyd & Vickers, 1971).

Los usos más comunes del lirio acuático son la producción de etanol (Aswathy et al., 2010; Guragain, Coninck, Husson, Durand, & Rakshit, 2011; Nigam, 2002), la producción de enzimas fúngicas (Deshpande, Nair, & Khedkar, 2009; Pramanik, 2010; Wang, Liu, Ning, Liao, & Jia, 2017), la remoción de metales pesados en agua (Mahamadi & Nharingo, 2010; Mishra & Tripathi, 2009; Muramoto & Oki, 1983; Saraswat & Rai, 2010), la fitorremediación (Jayaweera & Kasturiarachchi, 2004), la producción de biogás (Kivaisi & Mtila, 1997) y como fertilizante orgánico (Khaket, Singh, Dhanda, Singh, & Singh, 2012).

Diversos investigadores han analizado los componentes del lirio acuático de diferentes zonas geográficas. Lara-Serrano et al. (2016) estudiaron muestras de dos zonas geográficas de México (Durango y Guanajuato), y encontraron diferencias en cenizas, holocelulosa y extraíbles totales, mientras que Lakshminarayana, Rao, Pantulu, y Thyagarajan (1984) observaron diferencias en la composición de lípidos en raíces, tallos, hojas y flores. Por ello, para generar estrategias de aprovechamiento de esta especie, es fundamental conocer la influencia que tiene la zona geográfica y las partes de la planta sobre su composición. En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la zona de colecta y la sección de la planta de *Eichhornia crassipes* sobre su composición química en cuatro zonas geográficas de México (Ciudad de México, Hidalgo, Jalisco y Tabasco), con el fin de determinar la presencia de los principales componentes de esta especie para posibles aplicaciones biotecnológicas.

## Materiales y métodos

### Obtención de las muestras

Las muestras se colectaron en cuatro zonas de junio a agosto de 2016: presa San Antonio (Huasca de Ocampo, Hidalgo: 20° 13' 40" latitud norte y 98° 33' 45" longitud

### Sample preparation

Fifty specimens were taken per collection area, within which there were mature, medium-aged and young plants; this was done at the same time of year so that the effect of the plant's age on its chemical composition was minimal. The plants were washed with cold water, sectioned and classified: small leaf (SL) and small stalk (SS), medium-sized leaf (ML) and medium-sized stalk (MS), large leaf (LL) and large stem (LS), for the upper, middle and lower parts of the plant, respectively (Figure 1). Samples were dried at 60 °C for 36 h with a convection oven (DHG-9000J, MTI Corporation, USA), then ground, sieved in a 40 mesh (0.425 mm), placed in dark bags and stored in a cool, dry place for analysis.

### Chemical analysis

**Material extractable in organic solvents.** TAPPI standard T-204 om-88 was used by means of a Soxhlet system and hexane as solvent. For the analysis, 10 g of each sample were used.

**Material extractable in water.** TAPPI standard T-207 om-93 was used in the residue resulting from extraction with solvents.

**Ash content.** It was determined in accordance with TAPPI standard T-211 om-93, for which 1 g of sample was used.

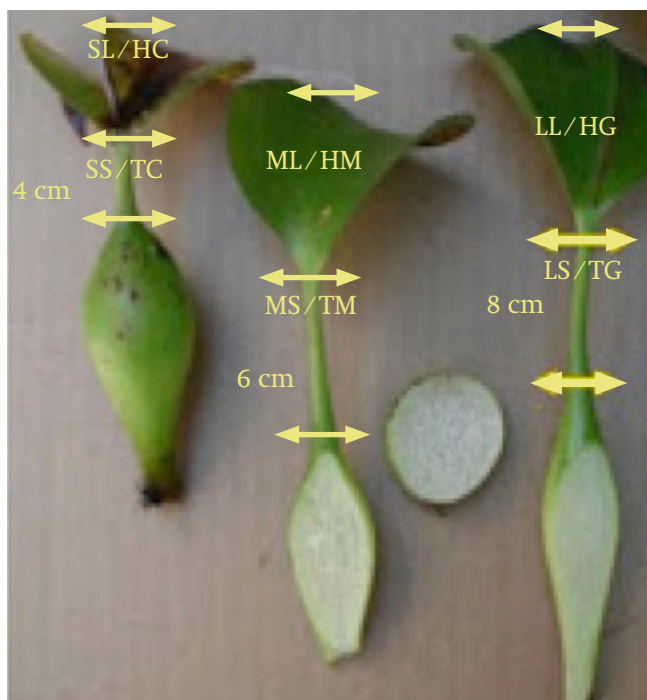
oeste), embarcadero de Cuemanco (Ciudad de México: 19° 16' 06" latitud norte y 99° 06' 15" longitud oeste), lago de Chapala (Jalisco: 19° 16' 32" latitud norte y 99° 06' 05" longitud oeste) y Villahermosa (Tabasco: 18° 10' 99" latitud norte y 93° 10' 92" longitud oeste).

### Preparación de las muestras

Se tomaron 50 especímenes por zona de colecta, dentro de los cuales había plantas maduras, medianas y jóvenes; esto se hizo en la misma época del año para que el efecto de la edad de la planta sobre la composición química fuera mínima. Las plantas se lavaron con agua fría, se seccionaron y se clasificaron: hoja chica (HC) y tallo chico (TC), hoja mediana (HM) y tallo mediano (TM), hoja grande (HG) y tallo grande (TG), para las partes superior, media e inferior de la planta, respectivamente (Figura 1). Las muestras se secaron a 60 °C durante 36 h con un horno de convección (DHG-9000J, MTI Corporation, EUA), posteriormente se molieron, se cribaron en una malla 40 (0.425 mm), se colocaron en bolsas oscuras y se almacenaron en un lugar fresco y seco para su análisis.

### Análisis químicos

**Material extraíble en solventes orgánicos.** Se utilizó la norma TAPPI T-204 om-88 mediante un sistema Soxhlet y hexano como solvente. Para el análisis se usaron 10 g de cada muestra.



**Figure 1.** Parts of the water hyacinth plant. SL = small leaf; SS = small stalk; ML = medium-sized leaf; MS = medium-sized stalk; LL = large leaf; LS = large stalk.

**Figura 1.** Fracciones de la planta de lirio acuático. HC = hoja chica; TC = tallo chico; HM = hoja mediana; TM = tallo mediano; HG = hoja grande; TG = tallo grande.

**Lignin insoluble in acid.** From 1 g of sample, the percentage of lignin present was determined by weight difference in accordance with TAPPI standard T-222 om-88.

**Holocellulose content.** One hundred mL of sodium chlorite at 1.5 % and glacial acetic acid were added to 2 g of sample. The reaction was carried out at 75 °C for 5 h. The mixture was then filtered in a Gooch crucible, washed with acetone and dried at 105 °C for 1 h. The percentage of holocellulose was determined by the difference between the initial and final weight.

All samples were analyzed in triplicate and the results were expressed as a percentage on a dry basis.

### Statistical analysis

An analysis of variance, a multivariate analysis, a correlation analysis and Fisher's least significant difference (LSD) test ( $\alpha \leq 0.05$ ) were carried out with the results obtained, for which Statistica 7 software was used.

### Results and discussion

To identify significant differences among the parts, a multivariate statistical analysis was carried out (Table 1), which indicated that both the parts (leaves and stalks) and the collection areas (four states of Mexico) had a significant effect on the variables evaluated. On the other hand, in the results of the LSD analysis, it can be seen that the percentage of ash, solvent extractives and water extractives (Figure 2) showed a greater statistical difference ( $\alpha \leq 0.05$ ) in the samples from Jalisco.

Regarding chemical composition, great differences were observed, both in the parts analyzed and in the collection area, with the holocellulose content (cellulose + hemicellulose) having the least variation (Figure 3C). As for ash content, samples from Mexico City, Hidalgo and Tabasco averaged 16.16, 17.56 and 19.8 %, respectively (Figure 3), and showed no statistically significant differences among them (Figure 2). The samples with

**Material extraíble en agua.** Se empleó la norma TAPPI T-207 om-93 en el residuo resultante de la extracción con solventes.

**Contenido de cenizas.** Se determinó de acuerdo con la norma TAPPI T-211 om-93, para lo cual se utilizó 1 g de muestra.

**Lignina insoluble en ácido.** A partir de 1 g de muestra se determinó el porcentaje de lignina presente por diferencia de peso de acuerdo con la norma TAPPI T-222 om-88.

**Contenido de holocelulosa.** A 2 g de muestra se le adicionaron 100 mL de clorito de sodio al 1.5 % y ácido acético glacial. La reacción se llevó a cabo a 75 °C durante 5 h. Posteriormente, la mezcla se filtró en un crisol Gooch, se lavó con acetona y se secó a 105 °C por 1 h. El porcentaje de holocelulosa se determinó por diferencia de peso entre el inicial y el final.

Todas las muestras se analizaron por triplicado y los resultados se expresaron como porcentaje en base seca.

### Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza, un análisis multivariado, un análisis de correlación y una comparación de diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher ( $\alpha \leq 0.05$ ), para lo cual se empleó el programa Statistica 7.

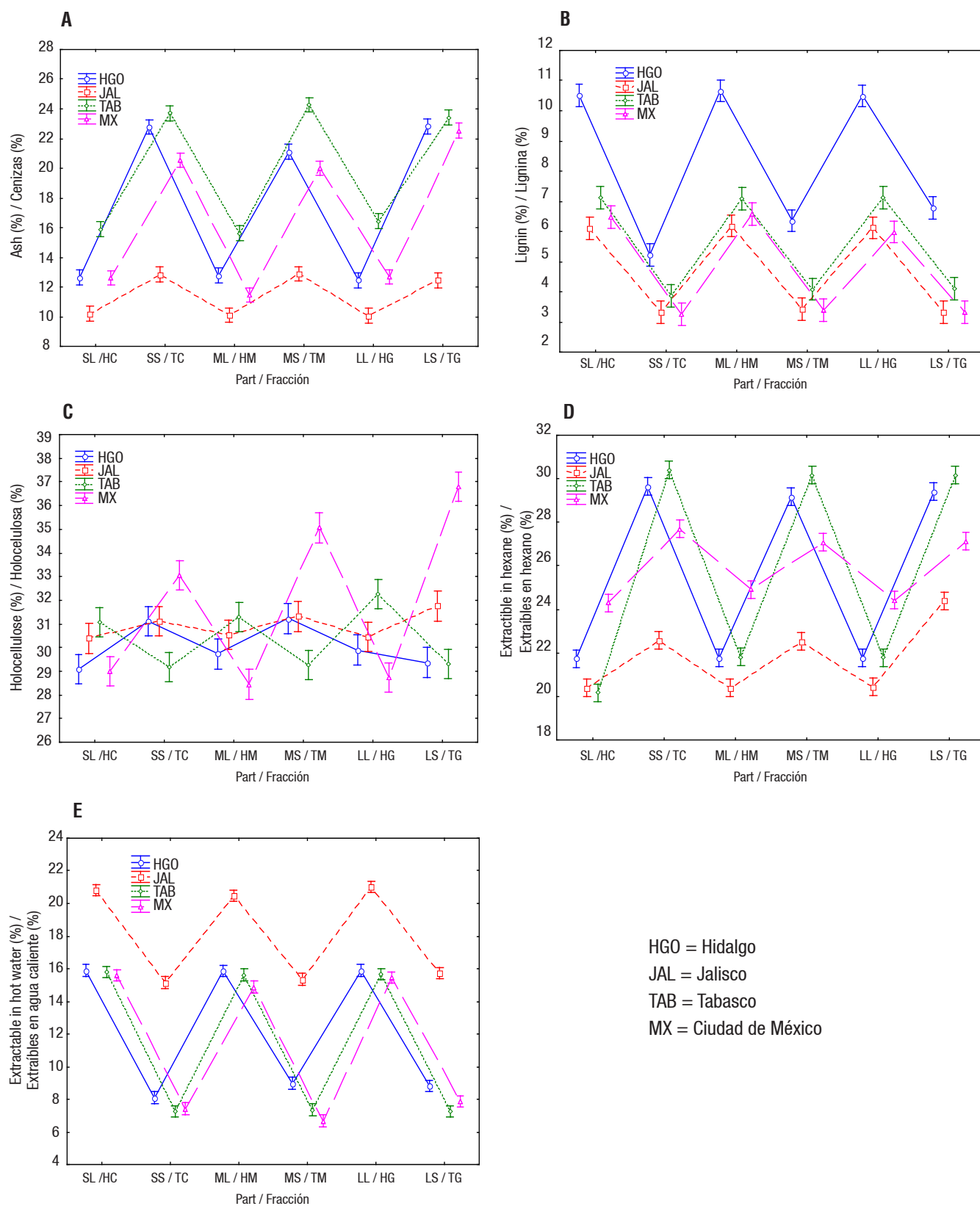
### Resultados y discusión

Para identificar diferencias significativas entre las fracciones, se realizó un análisis estadístico multivariado (Cuadro 1), el cual indicó que tanto las fracciones (hojas y tallos) como las zonas de colecta (los cuatro estados de México) presentaron un efecto significativo sobre las variables evaluadas. Mientras que en los resultados del análisis de DMS, se observa que el porcentaje de cenizas, extraíbles en solvente y en agua (Figura 2) presentaron una mayor diferencia estadística ( $\alpha \leq 0.05$ ) en las muestras provenientes de Jalisco.

**Table 1. Multivariate test of significance for the analyzed parts (leaves and stalks) and states of Mexico (Mexico City, Hidalgo, Jalisco and Tabasco).**

**Cuadro 1. Prueba multivariada de significancia para las fracciones analizadas (hojas y tallos) y estados de México (Ciudad de México, Hidalgo, Jalisco y Tabasco).**

	Value / Valor	F	Effect / Efecto	Error	P
Intercept / Intercepto	0.000051	171652.4	5	44.0000	0.00
State / Estado	0.000011	494.6	15	121.8660	0.00
Part / Fracción	0.000446	46.0	25	164.9547	0.00
State x part / Estado x fracción	0.000051	19.7	75	214.9682	0.00



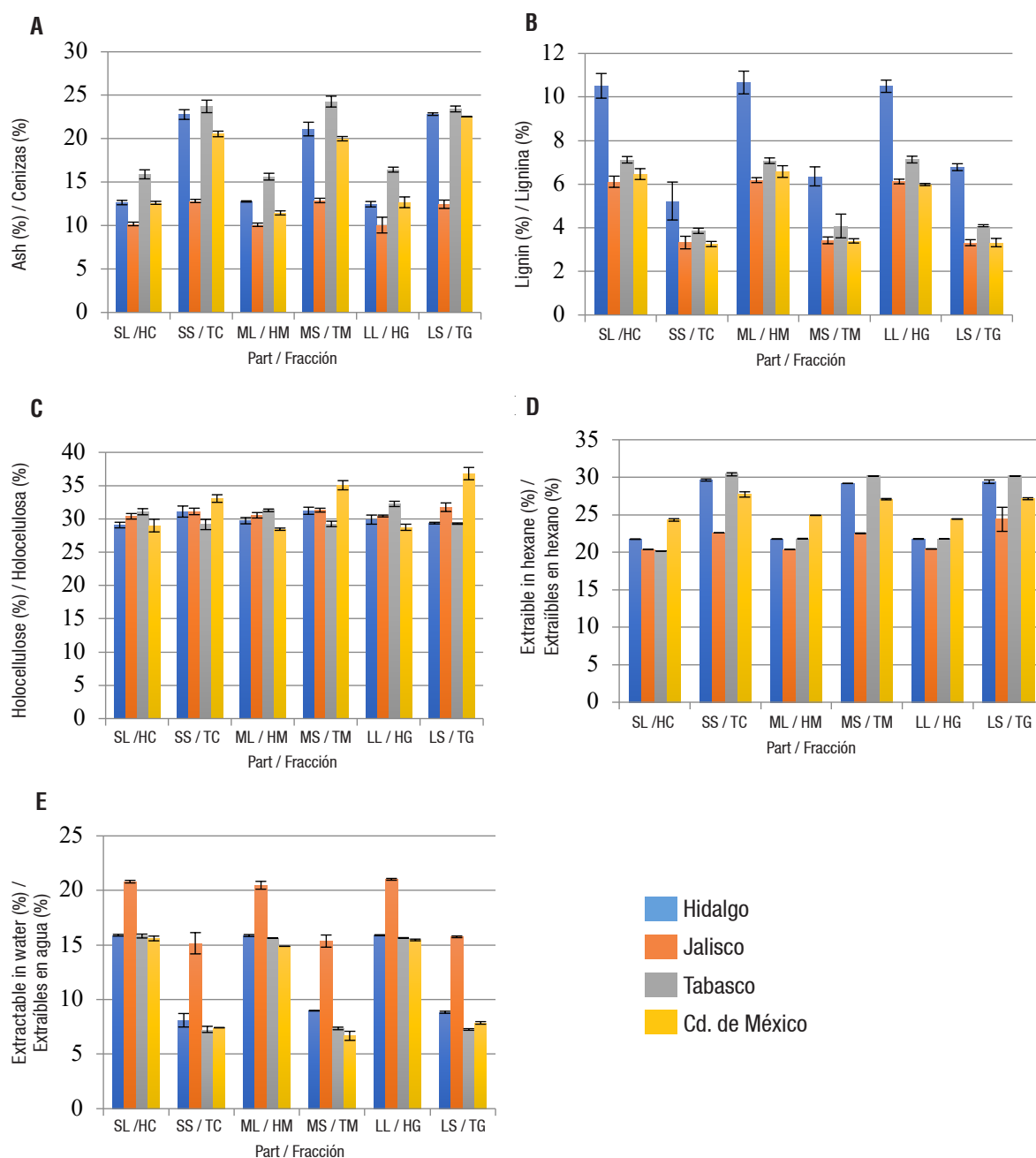
**Figure 2.** Graphs of the least significant difference (LSD) analysis of water hyacinth samples. SL = small leaf; SS = small stalk; ML = medium-sized leaf; MS = medium-sized stalk; LL = large leaf; LS = large stalk.

**Figura 2.** Gráficas del análisis de diferencia mínima significativa (DMS) de las muestras de lirio acuático. HC = hoja chica; TC = tallo chico; HM = hoja mediana; TM = tallo mediano; HG = hoja grande; TG = tallo grande.

the lowest concentration were those from Jalisco, while those from Tabasco had the highest (Figure 3A). Gao, Chen, Yuan, Huang, and Yan (2013) report an ash content of 45 % and Ma et al. (2010) of 2.8 %, both of hyacinth collected in China, but from different areas, which could evidence the effect of geographical area on the chemical composition of the plant.

Atehortua and Gartner (2013) mention that that the increased ash content may be due to a higher adsorption

En cuanto a la composición se observaron grandes diferencias, tanto en las fracciones analizadas como en la zona de colecta, siendo el contenido de holocelulosa (celulosa + hemicelulosa) el que tuvo menor variación (Figura 3C). En cuando al contenido de cenizas, las uestras provenientes de la Ciudad de México, Hidalgo y Tabasco presentaron, en promedio, 16.16, 17.56 y 19.8 %, respectivamente (Figura 3), y no mostraron diferencias estadísticas significativas entre sí (Figura 2). Las muestras que tuvieron la menor



**Figure 3. Concentration of the main components of the water hyacinth. SL = small leaf; SS = small stalk; ML = medium-sized leaf; MS = medium-sized stalk; LL = large leaf; LS = large stalk.**

**Figura 3. Concentración de los principales componentes del lirio acuático. HC = hoja chica; TC = tallo chico; HM = hoja mediana; TM = tallo mediano; HG = hoja grande; TG = tallo grande.**

of metals present in the water, which remain stable during calcination; in this sense, this increase could be an indication of pollution of the waterbodies at the hyacinth collection site. Lara-Serrano et al. (2016) found large differences in the ash content of water hyacinth from two geographical areas of Mexico (Durango and Guanajuato), being higher in the samples from Durango (26 %) than in those from Guanajuato (14.6 %), probably due to different concentrations of elements such as silicon, magnesium, chlorides, potassium, calcium and iron. In general, Figure 3A shows that the stalk has more ash because it functions as a vascular system that allows the flow of nutrients to the leaves and vice versa; also, metals in water are likely to be more easily absorbed by this system.

On the other hand, the highest percentage of lignin was observed in the samples collected in the state of Hidalgo, on average 8 % (Figure 3B), and in all collection areas the highest percentage was found in the leaves. This coincides with Balasubramanian, Arunachalam, Da, and Arunachalam (2012), who found higher lignin content in water hyacinth leaves than roots collected in three geographical areas of India. Lignin plays a very important role since, in addition to protecting the plant against attack by various organisms, it is part of the vascular and support systems of the plant; therefore, since the hyacinth is a surface plant where the leaves are responsible for its buoyancy, it is assumed that the lignin is present in greater quantity in this part of the plant.

Neiff, Casco, and de Neiff (2008) determined that the amount of lignin in *E. crassipes* is a function of the water levels in the lakes where it grows, and that long periods of confinement of the plant cause an increase in the lignin concentration. It is likely that in the state of Hidalgo there is little water exchange and with low levels, which would explain, in part, the high percentages of lignin found in the hyacinth collected in this state. On the other hand, the hyacinth from Jalisco and Mexico City had the lowest lignin concentrations, on average 4.6 and 4.7 %, respectively (Figure 3), values very similar to those described by Nigam (2002), Sornvoraweat and Kongkiattikajorn (2010), and below those reported by Gao et al. (2013) (17 % lignin in hyacinth from the Liuxi River in China) and Ma et al. (2010) (29.3 % lignin from hyacinth collected in China).

In general, the largest amount of solvent extractives was presented in the stalks of all samples (Figure 3D), with the Jalisco samples having the largest statistical difference (Figure 2). The results obtained agree with the findings of Silva, de Melo, Silvestre, and Silva (2015), who reported in *E. crassipes* a concentration of solvent extractives of 31.49 and 24.23 % for stalks and leaves, respectively, although they are lower than

concentración fueron las procedentes de Jalisco, y las de Tabasco fueron las mayores (Figura 3A). Gao, Chen, Yuan, Huang, y Yan (2013) reportan un contenido de cenizas de 45 % y Ma et al. (2010) de 2.8 %, ambos de lirio colectado en China, pero de diferentes zonas, lo que podría evidenciar el efecto de la zona geográfica sobre la composición química de la planta.

Atehortua y Gartner (2013) mencionan que es posible que el incremento en el contenido de cenizas se deba a una mayor adsorción de metales presente en el agua, los cuales permanecen estables durante la calcinación; en este sentido, dicho incremento podría ser un indicativo de contaminación de los cuerpos acuíferos del lugar de colecta del lirio. Lara-Serrano et al. (2016) encontraron grandes diferencias en el contenido de cenizas de lirio acuático de dos zonas geográficas de México (Durango y Guanajuato), siendo mayor en las muestras de Durango (26 %) que en las de Guanajuato (14.6 %), debido, probablemente, a las diferentes concentraciones de elementos como silicio, magnesio, cloruros, potasio, calcio y hierro. En general, en la Figura 3A se observa que el tallo presenta mayor cantidad de cenizas, esto debido a que funciona como un sistema vascular que permite el flujo de nutrientes hacia las hojas y viceversa; además, es probable que los metales presentes en el agua sean absorbidos con mayor facilidad por este sistema.

Por otro lado, el mayor porcentaje de lignina se observó en las muestras colectadas en el estado de Hidalgo, en promedio 8 % (Figura 3B), y en todas las zonas de colecta el mayor porcentaje lo presentaron las hojas. Esto coincide con Balasubramanian, Arunachalam, Da, y Arunachalam (2012), quienes encontraron mayor contenido de lignina en hojas que en raíces de lirio acuático colectado en tres zonas geográficas de la India. La lignina juega un papel de suma importancia, ya que además de proteger a la planta contra el ataque de diversos organismos, forma parte de los sistemas vasculares y de soporte de la planta; por ello, al ser el lirio una planta de superficie donde las hojas son las responsables de su flotabilidad, es de suponerse que la lignina se presente en mayor cantidad en esta parte de la planta.

Neiff, Casco, y de Neiff (2008) determinaron que la cantidad de lignina en *E. crassipes* está en función de los niveles de agua de los lagos donde crece, y que periodos largos de confinamiento de la planta provocan incremento en la concentración de lignina. Es probable que en el estado de Hidalgo se tenga poco intercambio de agua y con bajos niveles, lo que explicaría, en parte, los altos porcentajes de lignina encontrados en el lirio colectado en este estado. Por su parte, el lirio proveniente de Jalisco y de la Ciudad de México presentaron las menores concentraciones de lignina, en promedio 4.6 y 4.7 %, respectivamente (Figura 3); valores muy similares a los descritos por Nigam (2002) y Sornvoraweat y Kongkiattikajorn (2010), y por debajo



those reported by Lakshminarayana et al. (1984) (64.4 % of solvent extractives in leaves and stalks). The main extractable compounds can be waxes, resins, fatty acids and their esters, unsaponifiable substances and chlorophyll (Sluiter et al., 2005). It has been reported that this type of compound can act as a catalyst in the oxidation of lignocellulose, specifically hemicellulose and lignin (Burgois, Bartholin, & Gutonnet, 1989), and that the age of the plant has an important effect on its concentration.

In the case of water-extractable compounds, Figure 3E shows that the greatest amount was presented in the leaves (Figure 3E). In this process, water-soluble compounds such as non-structural carbohydrates, salts and some nitrogenous substances are extracted. The samples collected in Jalisco had the highest percentage of aqueous extractives, with an average value of 20 % in leaves and 15 % in stalks, which is consistent with what was reported by Tan et al. (2008). These results suggest that there is an effect of both the collection area and the plant part.

Finally, the holocellulose content was very similar in all parts, although it was slightly higher in samples collected in Mexico City (Figure 3C). Carbohydrates present in holocellulose are of great interest, as they can be used in a variety of biotechnological processes such as bioethanol production (Guragain et al., 2011). The holocellulose concentration found (about 32 %) differs from that described by other authors, which may be due to differences in climate, plant age, elevation and geographical area, among other things.

Balasubramanian et al. (2012) observed that the amount of holocellulose in water hyacinth collected in three different waterbodies in India was not consistent because it ranged from 68.8 to 78.6%; furthermore, they found that this percentage was affected by the part of the plant (roots, petioles or leaves). The holocellulose contents reported by other authors in *E. crassipes* samples, obtained from different geographical areas, were: 53.3 % (Abraham & Kurup, 1996), 66.9 % (Nigam, 2002), 52.9 % (Gunnarsson & Petersen, 2007), 67.6 % (Kumar, Singh, & Ghosh, 2009), 51.7 % (Sornvoraweat & Kongkiattikajorn, 2010), 47.5 % (Ma et al., 2010) and 41.6 % (Gao et al., 2013).

On the other hand, Table 2 shows the results of the contrast analysis (comparison between means), where it can be observed that the State-Part relationship did not present a significant difference; that is, both the stalks and the leaves (parts) of the plants collected in the same state do not have significant differences. The rest of the comparisons showed differences between them. As an example, the State-Ash relationship implies that the ash content of the plants is different in each of the states. In general, the contrast analysis indicated

de los reportados por Gao et al. (2013) (17 % de lignina en lirio del río Liuxi, en China) y Ma et al. (2010) (29.3 % de lignina en lirio colectado en China).

En general, la mayor cantidad de extraíbles en solventes se presentó en los tallos de todas las muestras (Figura 3D); en donde las muestras de Jalisco presentaron la mayor diferencia estadística significativa (Figura 2). Los resultados obtenidos concuerdan con lo descrito por Silva, de Melo, Silvestre, y Silva (2015), quienes reportaron en *E. crassipes* una concentración de extraíbles en solventes de 31.49 y 24.23 % para tallo y hojas, respectivamente; aunque son inferiores a los reportados por Lakshminarayana et al. (1984) (64.4 % de extraíbles en solventes en hojas y tallos). Los principales compuestos extraíbles pueden ser ceras, resinas, ácidos grasos y sus ésteres, sustancias insaponificables y clorofila (Sluiter et al., 2005). Se ha descrito que este tipo de compuestos pueden actuar como catalizadores en la oxidación de lignocelulosa, específicamente de la hemicelulosa y la lignina (Burgois, Bartholin, & Gutonnet, 1989), y que la edad de la planta tiene un efecto importante en su concentración.

Para el caso de los compuestos extraíbles en agua, se pudo observar que la mayor cantidad se presentó en las hojas (Figura 3E). En el proceso de extracción en agua se obtienen compuestos como carbohidratos no estructurales, sales y algunas sustancias nitrogenadas. Las muestras colectadas en Jalisco presentaron el mayor porcentaje de extraíbles acuosos, con un valor promedio de 20 % en hojas y 15 % en tallos, lo que concuerda con lo reportado por Tan et al. (2008). Estos resultados sugieren que hay un efecto tanto de la zona de colecta como de la fracción de la planta.

Finalmente, el contenido de holocelulosa fue muy parecido en todas las fracciones, aunque fue ligeramente mayor en las muestras colectadas en la Ciudad de México (Figura 3C). Los carbohidratos presentes en la holocelulosa son de gran interés, ya que se pueden emplear en una gran variedad de procesos biotecnológicos, como la producción de bioetanol (Guragain et al., 2011). La concentración de holocelulosa encontrada (alrededor de 32 %) difiere con lo descrito por otros autores, lo que puede deberse a las diferencias climáticas, edad de la planta, altitud, zona geográfica, entre otras cosas.

Balasubramanian et al. (2012) observaron que la cantidad de holocelulosa en lirio acuático colectado en tres diferentes cuerpos de agua en India no era consistente, debido a que varió de 68.8 a 78.6 %; además, encontraron que dicho porcentaje se veía afectado por la parte de la planta (raíces, peciolo u hojas). Los contenidos de holocelulosa reportados por otros autores en muestras de *E. crassipes*, provenientes de zonas geográficas diferentes, fueron: 53.3 % (Abraham &

**Table 2. Contrast analysis between the different parts studied ( $\alpha \leq 0.05$ ).****Cuadro 2. Análisis de contraste entre las diferentes fracciones estudiadas ( $\alpha \leq 0.05$ ).**

Contrast/Contraste	Significance/ Significancia	Difference/ Diferencia	+/- Limits / +/- Límites
State - Part/Estado - Fracción	-	-1.0	1.06071
State - Ash/Estado - Cenizas	*	-13.8471	1.06071
State - Lignin/Estado - Lignina	*	-3.37039	1.06071
State - Holocellulose/Estado - Holocelulosa	*	-28.3097	1.06071
State - SE <sup>1</sup> /Estado - ES <sup>1</sup>	*	-22.2604	1.06071
State - WE/Estado - EA	*	-10.792	1.06071
Part - Ash/Fracción - Cenizas	*	-12.8471	1.06071
Part - Lignin/Fracción - Lignina	*	-2.37039	1.06071
Part - Holocellulose/Fracción - Holocelulosa	*	-27.3097	1.06071
Part - SE/Fracción - ES	*	-21.2604	1.06071
Part - WE/Fracción - EA	*	-9.79203	1.06071
Ash - Lignin/Cenizas - Lignina	*	10.4767	1.06071
Ash - Holocellulose/Cenizas - Holocelulosa	*	-14.4626	1.06071
Ash - SE/Cenizas - ES	*	-8.41326	1.06071
Ash - WE/Cenizas - EA	*	3.05508	1.06071
Lignin - Holocellulose/Lignina - Holocelulosa	*	-24.9393	1.06071
Lignin - SE/Lignina - ES	*	-18.89	1.06071
Lignin - WE/Lignina - EA	*	-7.42164	1.06071
Holocellulose - SE/Holocelulosa - ES	*	6.04934	1.06071
Holocellulose - WE/Holocelulosa - EA	*	17.5177	1.06071
SE - WE/ES - EA	*	11.4683	1.06071

<sup>1</sup>SE = solvent-extractable compounds; WE = water-extractable compounds.

<sup>1</sup>ES = compuestos extraíbles en solventes; EA = compuestos extraíbles en agua.

**Table 3. Formation of homogeneous groups from the least significant difference (LSD) analysis of the samples from four areas of Mexico.****Cuadro 3. Formación de grupos homogéneos a partir del análisis de la diferencia mínima significativa (DMS) de las muestras provenientes de cuatro zonas de México.**

Chemical compound/ Compuesto químico	Homogeneous groups ( $\alpha \leq 0.05$ ) / Grupos homogéneos ( $\alpha \leq 0.05$ )					
	SL <sup>1</sup> /HC <sup>1</sup>	SS/TC	ML/HM	MS/TM	LL/HG	LS/TG
Ash/Cenizas	Tab Hgo-Mx Jal	Tab-Hgo Mx Jal	Tab Hgo Mx-Jal	Tab Hgo-Mx Jal	Tab Hgo-Mx Jal	Tab-Hgo-Mx Jal
Lignin/Lignina	Hgo Tab-Mx Mx-jal	Hgo Tab-Jal-Mx	Hgo Tab-Mx Mx-jal	Hgo Tab-Jal-Mx	Hgo Tab Jal-Mx	Hgo Tab-Jal-Mx
Holocellulose/ Holocelulosa	Tab-Jal-Hgo Hgo-Mx	Mx Hgo-Jal Tab	Tab-Jal-Hgo Mx	Mx Hgo-Jal Tab	Tab Jal-Hgo Hgo-Mx	Mx Jal Hgo-Tab
Solvent-extractible/ Extraíbles en solventes	Mx Hgo Jal-Tab	Tab-Hgo Mx Jal	Mx Hgo-Tab Jal	Tab-Hgo Mx Jal	Mx Hgo-Tab Jal	Tab-Hog Mx Jal
Water-extractible/ Extraíbles en agua	Jal Hgo-Tab-Mx	Jal Hgo-Mx-Tab	Jal Hgo-Tab Tab-Mx	Jal Hgo Tab-Mx	Jal Hgo-Tab-Mx	Jal Hgo Mx-Tab

<sup>1</sup>SL = small leaf; SS = small stalk; ML = medium-sized leaf; MS = medium-sized stalk; LL = large leaf; LS = large stalk; Mx = Mexico City; Hgo = Hidalgo; Jal = Jalisco; Tab = Tabasco.

<sup>1</sup>HC = hoja chica; TC = tallo chico; HM = hoja mediana; TM = tallo mediano; HG = hoja grande; TG = tallo grande; Mx = Ciudad de México; Hgo = Hidalgo; Jal = Jalisco; Tab = Tabasco.

that the parts (leaf and stalk), the components (ash, water extractives, solvent extractives and holocellulose content) and the state (Mexico City, Hidalgo, Jalisco and Tabasco) all show statistical differences when compared to each other.

Due to the variability observed among the samples and to determine if the collection area influences the composition of the plant, homogeneous groups were formed from the LSD analysis (Table 3). It can be seen that in the ash content, the samples from Jalisco, which had the least amount of this compound, did not show differences with respect to the samples from Mexico City in the ML part. In the case of lignin, the largest amount was detected in the samples from Hidalgo, a state that did not form groups in any part, while the lignin present in SS, MS and LS does not differ statistically from each other, since the same groups are formed.

The holocellulose concentration showed greater heterogeneity, both in stalks and leaves, where the SS, MS and LS samples from Mexico City were grouped independently. The same occurred with the solvent-extractable compounds, of which the samples from Mexico City were independent from the other states, these for the case of SL, ML and LL, and the samples from Jalisco were the ones that showed the greatest differences, except for SL (Table 3). Finally, it was observed in the water-extractable compounds that the Jalisco samples had the highest concentration of these compounds, and showed no similarity with the samples from the other states.

In general, the results obtained can facilitate decision-making regarding the processing of water hyacinth for various biotechnological processes, such as obtaining carbohydrates, or as a possible indicator of waterbody pollution.

## Conclusions

The results provide information on the chemical composition of the water hyacinth (*E. crassipes*) from four areas of Mexico (Mexico City, Hidalgo, Jalisco and Tabasco), which showed great heterogeneity. Both leaves and stalks showed significant statistical differences in chemical composition. Samples from Tabasco had the highest concentration of ash, those from Hidalgo the highest concentration of lignin and those from Jalisco the highest percentages of water-extractible compounds. On the other hand, holocellulose showed the highest variability with least significant differences, both at the level of collection area and plant part. This suggests that for the processing of the plant it is important to take into account the geographical area and the part thereof.

Kurup, 1996), 66.9 % (Nigam, 2002), 52.9 % (Gunnarsson & Petersen, 2007), 67.6 % (Kumar, Singh, & Ghosh, 2009), 51.7 % (Sornvoraweat & Kongkiattikajorn, 2010), 47.5 % (Ma et al., 2010) y 41.6 % (Gao et al., 2013).

Por otra parte, el Cuadro 2 presenta los resultados del análisis de contraste (comparación entre medias), y se puede observar que la relación Estado-Fracción no presentó diferencia significativa; es decir, que tanto los tallos como las hojas (fracciones) de las plantas colectadas en un mismo estado no presentan diferencias significativas. El resto de las comparaciones mostraron diferencias entre sí. A manera de ejemplo, la relación Estado-Cenizas implica que el contenido de cenizas de las plantas es diferente en cada uno de los estados. En general, el análisis de contraste indicó que tanto las fracciones (hoja y tallo), como los componentes (cenizas, extraíbles en agua, en solvente y contenido de holocelulosa) y el estado (Ciudad de México, Hidalgo, Jalisco y Tabasco) presentan diferencias estadísticas cuando se comparan entre sí.

Debido a la variabilidad observada entre las muestras y para determinar si la zona de colecta influye en la composición de la planta, a partir del análisis de DMS se formaron grupos homogéneos (Cuadro 3). Se puede observar que en el contenido de cenizas, las muestras provenientes de Jalisco, que fueron las que presentaron menor cantidad de este compuesto, no mostraron diferencias con respecto a las muestras de la Ciudad de México en la fracción de HM. Para el caso de la lignina, la mayor cantidad se detectó en las muestras de Hidalgo, estado que no formó grupos en ninguna fracción, mientras que la lignina presente en TC, TM y TG no difiere estadísticamente entre sí, ya que se forman los mismos grupos.

La concentración de holocelulosa mostró mayor heterogeneidad tanto en tallos como en hojas, en donde las muestras de TC, TM y TG de la Ciudad de México se agruparon de manera independiente. Lo mismo ocurrió con los compuestos extraíbles en solventes; de los cuales, las muestras de la Ciudad de México fueron independientes a los otros estados, esto para el caso de HC, HM y HG, y las muestras de Jalisco fueron las que mostraron las mayores diferencias, a excepción de HC (Cuadro 3). Finalmente, en los compuestos extraíbles en agua se observó que las muestras de Jalisco tuvieron la mayor concentración de estos compuestos, y no mostraron similitud con las muestras de los otros estados.

De manera general, los resultados obtenidos pueden facilitar la toma de decisiones en cuanto al procesamiento del lirio acuático para diversos procesos biotecnológicos, como la obtención de carbohidratos, o como posible indicativo de contaminación de cuerpos de agua.

## Acknowledgments

The authors thank the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (CONACYT) for the funding granted through Project 24711, within the framework of the call to address national problems.

### End of English version

## References / Referencias

- Abraham, M., & Kurup, M. (1996). Bioconversion of tapioca (*Manihot esculenta*) waste and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) - Influence of various physico-chemical factors. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 82(3), 259-263. doi: 10.1016/0922-338X(96)88817-9
- Aswathy, U. S., Sukumaran, R. K., Devi, G. L., Rajasree, K. P., Singhanian, R. R., & Pandey, A. (2010). Bio-ethanol from water hyacinth biomass: An evaluation of enzymatic saccharification strategy. *Bioresource Technology*, 101(3), 925-930. doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.019
- Atehortua, E., & Gartner, C. (2013). Preliminary studies of *Eichhornia crassipes* dry biomass for lead and chromium removal from waters. *Revista Colombiana de Materiales*, 43, 81-92
- Balasubramanian, D., Arunachalam, K., Da, 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, 111-122. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.03.002
- Boyd, C. E., & Vickers, D. H. (1971). Variation in the elemental content of *Eichhornia crassipes*. *Hydrobiologia*, 38(3-4), 409-414. doi: 10.1007/BF00036546
- Brendonck, L., Maes, J., Rommens, W., Dekeza, N., Nhwatiwa, T., & Barson, M. (2003). The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). II. Species diversity. *Archives of Hydrobiology*, 158(3), 389-405. doi: 10.1127/0003-9136/2003/0158-0389
- Burgois, J., Bartholin, M. C., & Gutonnet, R. (1989). Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product. *Wood Science Technology*, 23(4), 303-310. doi: 10.1007/BF00353246
- Center, T. D. (1994). Biological control of weeds: water hyacinth and water lettuce. In: Rosen, D., Bennet, F. D., & Capinera, J. L. (Eds), *Pest management in the subtropics, biological control a Florida perspective* (pp. 481-521). U. K.: Intercep Ltd.
- Deshpande, P., Nair, S., & Khedkar, S. (2009). Water hyacinth as carbon source for the production of cellulase by *Trichoderma reesei*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 158(3), 552-560. doi: 10.1007/s12010-008-8476-9
- Epstein, P. (1998). Weeds bring disease to the east African waterways. *Lancet*, 351(9102), 351-577. doi: 10.1016/S0140-6736(05)78570-6

## Conclusiones

Los resultados proporcionan información sobre la composición química del lirio acuático (*E. crassipes*) de cuatro zonas de México (Ciudad de México, Hidalgo, Jalisco y Tabasco), las cuales presentaron gran heterogeneidad. Tanto las hojas como los tallos mostraron diferencias estadísticas significativas en su composición química. Las muestras provenientes de Tabasco tuvieron la mayor concentración de cenizas, las de Hidalgo la mayor concentración de lignina y las de Jalisco los mayores porcentajes de compuestos extraíbles en agua. Por otro lado, la holocelulosa fue la que mostró la mayor variabilidad con diferencias mínimas significativas, tanto a nivel de zona de colecta como de fracción de planta. Lo anterior sugiere que para el procesamiento de la planta es importante tomar en cuenta la zona geográfica y la fracción de la misma.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado a través del Proyecto 24711, dentro del marco de la convocatoria de atención a Problemas Nacionales.

### Fin de la versión en español

- Gao, J., Chen, K., Yuan, K., Huang, H., & Yan, Z. (2013). Ionic liquid pretreatment to enhance the anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 150, 352-358. doi: 10.1016/j.biortech.2013.10.026
- Gunnarsson, C. C., & Petersen, C. M. (2007). Water hyacinth as a resource in agriculture and energy production: a literature review. *Waste Management*, 27(1), 117-129. doi: 10.1016/j.wasman.2005.12.011
- Guragain, Y. N., Coninck, J. D., Husson, F., Durand, A., & Rakshit, S. K. (2011). Comparison of some new pretreatment methods for second generation bioethanol production from wheat straw and water hyacinth. *Bioresource Technology*, 102, 4416-4424. doi: 10.1016/j.biortech.2010.11.125
- Gutiérrez, E. L., Ruiz, E. F., Uribe, E. G., & Martínez, J. M. (2000). Biomass and productivity of water hyacinth and their application in control programs. *Proceedings of the second IOBC global working group on the biological and integrated control of water hyacinth*, 102, 109-119. Retrieved from <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/135372/2/PR102.pdf>
- Harley, K. L. S., Julien, M. H., & Wright, A. D. (1996). Water hyacinth: a tropical worldwide problem and methods for its control. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international weed control congress*, 2, 639-644.
- Heard, T. A., & Winterton, S. L. (2000). Interactions between nutrient status and weevil herbivory in the biological

- control of water hyacinth. *Journal of Applied Ecology*, 37(1), 117-21. doi: 10.1046/j.1365-2664.2000.00480.x
- Hellmann, J. J., Byers, J. E., Bierwagen, B. G., & Duker, J. S. (2008). Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology*, 22(3), 534-543. doi: 10.1111/j.1523-1739.2008.00951.x
- Humphrey, T. K., & Dube, T. (2018). Remote sensing of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review on applications and challenges. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 36-46. doi: 10.1016/j.rase.2018.02.005
- Jayaweera, M. W., & Kasturiarachchi, J. C. (2004). Removal of nitrogen and phosphorus from industrial wastewater using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms). *Water Science and Technology*, 50(6), 217-225. doi: 10.2166/wst.2004.0379
- Khaket, T. P., Singh, M., Dhanda, S., Singh, T., & Singh, J. (2012). Biochemical characterization of consortium compost of toxic weeds *Parthenium hysterophorus* and *Eichhornia crassipes*. *Bioresources Technology*, 123, 260-265. doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.107
- Kivaisi, A. K., & Mtila, M. (1997). Production of biogas from water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart) (Solms) in a two-stage bioreactor. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 14(1), 125-131. doi: 10.1023/A:100884500
- 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
- Lakshminarayana, G., Rao, K. S., Pantulu, A. J., & Thyagarajan, G. (1984). Composition of lipids in roots, stalks, leaves and flowers of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Aquatic Botany*, 20(3-4), 219-227. doi: 10.1016/0304-3770(84)90088-3
- Lara-Serrano, J. S., Rutiaga-Quiñones, O. M., López-Miranda, J., Fileto-Pérez, H. A., Pedraza-Bucio, F. E., Rico-Cerda, J. L., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2016). Physicochemical characterization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). *Bioresources*, 11(3), 7214-7223. Retrieved from <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/physicochemical-characterization-of-water-hyacinth-eichhornia-crassipes-mart-solms/>
- Ma, F., Yang, N., Xu, C., Yu, H., Wu, J., & Zhang, X. (2010). Combination of biological pretreatment with mild acid pretreatment for enzymatic hydrolysis and ethanol production from water hyacinth. *Bioresource Technology*, 101(24), 9600-9604. doi: 10.1016/j.biortech.2010.07.084
- Mahamadi, C., & Nharingo, T. (2010). Competitive adsorption of Pb<sup>+2</sup>, Cd<sup>+2</sup> and Zn<sup>+2</sup> ions onto *Eichhornia crassipes* in binary and ternary systems. *Bioresource Technology*, 101(3), 859-864. doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.097
- Malik, A. (2007). Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth. *Environmental International*, 33(1), 122-138. doi: 10.1016/j.envint.2006.08.004
- 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.hazmat.2008.09.020
- Muramoto, S., & Oki, Y. (1983). Removal of some heavy metals from polluted water by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 30(2), 170-177. doi: 10.1007/BF01610117
- Neiff, J. J., Casco, S. L., & de Neiff, A. P. (2008). Response of *Eichhornia crassipes* to water level fluctuations in two lakes with different connectivity in the Paraná River floodplain. *Revista de Biología Tropical*, 56(2), 613-623. doi: 10.15517/rbt.v56i2.5612
- Nigam, J. N. (2002). Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast. *Journal of Biotechnology*, 97(2), 107-116. doi: 10.1016/S0168-1656(02)00013-5
- Olivares, E., & Colonnello, G. (2000). Salinity gradient in the Mánamo River, a dammed distributary of the Orinoco Delta, and its influence on the presence of *Eichhornia crassipes* and *Paspalum rapens*. *Interciencia*, 25(5), 242-248. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33904704>
- Pramanik, P. (2010). Changes in enzymatic activities and microbial properties in vermicompost of water hyacinth as affected by pre-composting and fungal inoculation: A comparative study of ergosterol and chitin for estimating fungal biomass. *Waste Management*, 30(8-9), 1472-1476. doi: 10.1016/j.wasman.2010.02.026
- 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
- Silva, R. P., de Melo, M. W. R., Silvestre, A. J. D., & Silva, C. M. (2015). Polar and lipophilic extracts characterization of roots, stalks, leaves and flowers of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), and insights for its future valorization. *Industrial Crops and Products*, 76, 1033-1038. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.07.055
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., & Templeton, D. (2005). *Determination of ash in biomass. Laboratory Analytical Procedure*. U.S.A.: National Renewable Energy Laboratory.
- Sornvoraweat, B. & Kongkiattikajorn, J. (2010). Separated hydrolysis and fermentation of water hyacinth leaves for ethanol production. *KKU Research Journal*, 15(9), 794-802.
- Tan, L., Zhu, D., Zhou, Z., 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. doi: 10.1016/j.biortech.2007.08.022
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), Official Test Methods: T204 om-84 (Solvent extractives of wood and pulp); T207 om-93 (Water solubility of wood and pulp); T211 om-93 (Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at

- 525 °C) and T222 om-88 (Acid insoluble lignin in wood and pulp).
- Villamagna, A. M., & Murphy, B. R. (2010). Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshwater Biology*, 55(2), 282-289. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02294.x
- Wang, Z., Liu, J., Ning, Y., Liao, X., & Jia, Y. (2017). *Eichhornia crassipes*: Agro-waster for a novel thermostable laccase production by *Pycnoporus sanguineus* SYBC-L1. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 123(2), 163-169. doi: 10.1016/j.jbiosc.2016.09.005
- Wilson, J. R., Holst, N., & Rees, M. (2005). Determinants and patterns of population growth in water hyacinth. *Aquatic Botanic*, 81(1), 51-67. doi: 10.1016/j.aquabot.2004.11.002