

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Adsorción de cadmio, hierro y plomo en agua artificial  
utilizando *Moringa oleifera* Lam.**

**Proyecto de investigación**

**Andrés Sebastián Lagos Estrella**

**Ingeniería Química**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Químico

Quito, 1 de junio de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Adsorción de cadmio, hierro y plomo en agua artificial utilizando *Moringa oleifera* Lam.**

**Andrés Sebastián Lagos Estrella**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Andrea C. Landázuri Flores, PhD

Firma del profesor

---

Nombre del profesor, Título académico

Michel Vargas, PhD

Firma del profesor

---

Quito, 1 de junio de 2017

## **DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

---

Nombres y apellidos:

Andrés Sebastián Lagos Estrella

Código:

00112195

Cédula de Identidad:

1721202370

Lugar y fecha:

Quito, 1 de junio de 2017

## RESUMEN

En esta investigación se estudia la remoción de metales pesados presentes en el agua (cadmio, hierro y plomo) por medio de *Moringa oleifera* Lam. (MO), definiendo las variables cinéticas de adsorción y parámetros que la afectan. Para esto, se trataron previamente a las semillas mediante la extracción de su aceite por método Soxhlet. Se prepararon diversas soluciones con contenido de Cd, Fe y Pb, y se sometieron al contacto con el adsorbente variando diferentes parámetros: tiempo de contacto, concentración inicial de iones en el agua, pH, dosis de adsorbente y agua multicomponente. La cantidad de metales fue medida mediante espectrofotometría de absorción atómica. Se probaron varios niveles de los siguientes parámetros: pH 4.0 – 6.0; tiempo de contacto 0 – 60 min; dosis de MO 0.0 – 2.0 g/L; concentración inicial de iones Cd 0.2 – 1.0 mg/L, Fe 1.0 – 5.0 mg/L, Pb 2.0 – 10 mg/L y se determinaron las condiciones de mayor remoción de estos. Con estas condiciones determinadas, se encontró que la carga de iones en el equilibrio,  $q_e$ , fue de 0.106 mg Cd/g MO (95.6% de remoción), 1.850 mg Fe/ g MO (90.4% de remoción) y 1.156 mg Pb/ g MO (97.0% de remoción).

**Palabras clave:** *Moringa oleifera* Lam., metales pesados, tratamiento, aguas residuales, isoterma, adsorción.

## ABSTRACT

This research studies the removal of heavy metals present in water (cadmium, iron and lead) by *Moringa oleifera* Lam. (MO), defining the adsorption kinetic variables and parameters that affect it. At first, the seeds were treated previously by the extraction of their oil by Soxhlet method. Several solutions with Cd, Fe and Pb were prepared and subjected to contact with the adsorbent varying different parameters: contact time, initial ion concentration in the water, pH, adsorbent dose and multicomponent water. The amount of metals in water was measured by atomic absorption spectrophotometry. Several levels of the following parameters were tested: pH 4.0 - 6.0; contact time 0 - 60 min; dose of MO 0.0 - 2.0 g / L; concentration of Cd 0.2 - 1.0 mg / L, Fe 1.0 - 5.0 mg / L, Pb 2.0 - 10 mg / L, and the conditions of greatest removal of these ions were determined. With these conditions, the ion load at equilibrium,  $q_e$ , was 0.106 mg Cd / g MO (95.6% removal), 1.850 mg Fe / g MO (90.4% removal) and 1.156 mg Pb / g MO (97.0% removal).

**Key words:** *Moringa oleifera* Lam., heavy metals, treatment, waste water, isotherms, adsorption.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Derechos de Autor.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>5</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>10</b>
<b>Materiales y Métodos.....</b>	<b>13</b>
<b>Materiales y reactivos .....</b>	<b>13</b>
<b>Métodos.....</b>	<b>13</b>
Tratamiento de las semillas.....	13
Estudio de cinética de adsorción y tiempo de contacto. ....	14
Estudio del efecto de concentración inicial de iones e isoterma de adsorción.....	15
Estudio del efecto del pH. ....	16
Estudio del efecto de dosis de adsorbente. ....	16
Estudio sobre agua multicomponente. ....	17
Análisis. ....	17
<b>Resultados y discusiones.....</b>	<b>18</b>
<b>Cinética de adsorción .....</b>	<b>18</b>
<b>Isotermas de adsorción .....</b>	<b>20</b>
<b>Efecto del tiempo de contacto.....</b>	<b>21</b>
<b>Efecto de la concentración inicial de iones metálicos .....</b>	<b>22</b>
<b>Efecto del pH.....</b>	<b>23</b>
<b>Efecto de la dosis de MO .....</b>	<b>25</b>
<b>Tratamiento de agua multicomponente con MO.....</b>	<b>26</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>27</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>28</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>30</b>
<b>Material suplementario .....</b>	<b>34</b>
<b>Análisis estadístico para Cd.....</b>	<b>34</b>
Efecto del tiempo de contacto .....	34
ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales).....	34
Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson).....	35
Efecto de la concentración inicial de iones .....	35
ANOVA .....	35
Comparación en parejas de Tukey.....	36
Efecto del pH .....	36
ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales).....	36
Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson).....	37
Efecto de la dosis de MO.....	37
ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales).....	37

Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson).....	38
<b>Análisis estadístico para Fe .....</b>	<b>38</b>
Efecto del tiempo de contacto .....	38
ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales).....	38
Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson).....	39
Efecto de la concentración inicial de iones .....	39
ANOVA .....	39
Comparación en parejas de Tukey.....	40
Efecto del pH .....	40
ANOVA .....	40
Comparación en parejas de Tukey.....	41
Efecto de la dosis de MO.....	41
ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales).....	41
Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson).....	42
<b>Análisis estadístico para Pb .....</b>	<b>42</b>
Efecto del tiempo de contacto .....	42
ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales).....	42
Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson).....	43
Efecto de la concentración inicial de iones .....	43
ANOVA .....	43
Comparación en parejas de Tukey.....	44
Efecto del pH .....	44
ANOVA .....	44
Comparación en parejas de Tukey.....	45
Efecto de la dosis de MO.....	45
ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales).....	45
Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson).....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de modelos cinéticos de pseudo-primer y segundo orden para Cd, Fe y Pb.....	19
<b>Tabla 2.</b> Parámetros de isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich para Cd, Fe y Pb...21	21
<b>Tabla 3.</b> Cuadro de resumen de resultados de la experimentación de los factores.....26	26
<b>Tabla 4.</b> Porcentaje de remoción de Cd, Fe y Pb con MO en agua multicomponente.....26	26



## ÍNDICE DE FIGURAS

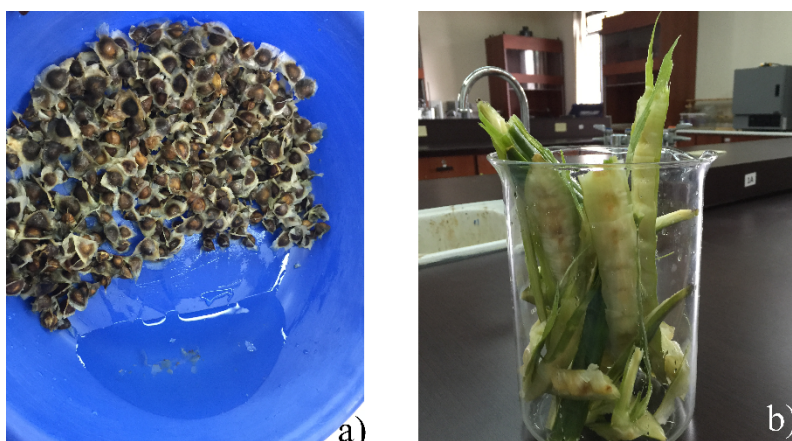
<b>Figura 1.</b> (a) semillas y (b) vainas de MO.....	11
<b>Figura 2.</b> Modelos cinéticos de adsorción para cadmio (a), hierro (b) y plomo (c).....	19
<b>Figura 3.</b> Isotermas de adsorción para cadmio (a), hierro (b) y plomo (c).....	20
<b>Figura 4.</b> Efecto de tiempo de contacto MO-solución de iones de Cd (a), Fe (b) y Pb (c).....	22
<b>Figura 5.</b> Efecto de la concentración inicial de iones para Cd (a), Fe (b) y Pb (c).....	23
<b>Figura 6.</b> Efecto del pH en la adsorción con MO de C (a), Fe (b) y Pb (c).....	24
<b>Figura 7.</b> Efecto de la dosis de MO en la adsorción de Cd (a), Fe (b) y Pb (c).....	25

## INTRODUCCIÓN

Procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales no incluye un tratamiento específico de remoción de metales pesados presentes en las descargas que pueden ser perjudiciales tanto para el ser humano como para el medioambiente. En el tratamiento primario de aguas residuales, la coagulación-floculación suele ayudar a remover estas sustancias tóxicas (Junior et al., 2013). Sin embargo, en los procesos terciarios se pueden incluir métodos para la eliminación de metales. Entre estos se incluyen la precipitación química, el intercambio iónico, coagulación química, ultrafiltración, uso de zeolita, uso de carbón activado, entre otros (Alfarra, Ali, & Yusoff, 2014; Ngah & Hanafiah, 2008). Algunos de estos son muy eficientes, pueden remover diversos metales pesados e incluso algunos son más selectivos para cierto metal, pero suelen ser mucho más costosos y pueden requerir equipos avanzados para su funcionamiento (Azizi, Kamika, & Tekere, 2016). Adicionalmente, se pueden generar subproductos contaminantes, por lo que se requiere un post-tratamiento. Un ejemplo es el carbón activado, que a pesar de tener una eficiencia mayor al 99%, no puede ser regenerado, deben tratarse sus residuos, su costo es elevado y el desempeño depende en gran medida de su calidad (Bailey, Olin, Bricka, & Adria, 1999; Karnib, Kabbani, Holail, & Olama, 2014). Por este motivo, se incentiva la búsqueda de nuevos materiales que requieran ser menos costosos y amigables con el ambiente. Un nuevo material que actualmente se investiga es la *Moringa oleifera* Lam. (MO), especialmente enfocado al uso de sus semillas.

La MO es un árbol caducifolio alto de la familia Moringaceae, originario del norte de la India. Debido a su facilidad de cultivo y alta adaptabilidad a las zonas tropicales, (Olson & Fahey, 2011), existen en el Ecuador algunas plantaciones y empresas especializadas en su comercio que promueven el uso de MO en el aspecto alimenticio debido a su poder nutricional: contiene

macro y micro nutrientes y es rico en proteínas y ácidos grasos insaturados. Cada 100 g de núcleo de semilla de MO contiene 4.08 g de agua, 38.4 g de proteínas crudas, 34.7 g de ácidos grasos, 16.4 g de N libre, 3.5 g de fibra y 3.2 g de materia inorgánica (Duke, 1983). Según varios estudios, la MO también tiene potencial en la producción de biodiesel (Eloka-Eboka & Inambao, 2016), uso como biomaterial (Bhatnagar, Parwani, Sharma, Ganguli, & Bhatnagar, 2013), en la industria cosmética y farmacéutica/medicinal (Gopalakrishnan, Doriya, & Kumar, 2016; Warra, 2014). En el presente estudio se evalúa otro uso adicional: tratamiento de efluentes (Araújo et al., 2010; Bichi, 2013; Matouq, Jildeh, Qtaishat, Hindiyeh, & Al Syouf, 2015; Ravikumar & K, 2013).



**Figura 1.** (a) semillas y (b) vainas de MO (A. Landázuri, Vargas, Cahuasquí, Egas, & Lagos, 2016).

Dentro de las aplicaciones de la MO, su uso como bioadsorbente es especialmente interesante. La bioadsorción es un proceso en el cual se remueven iones metálicos con la ayuda de biomasa viva o muerta y es una alternativa ecológica, y generalmente económica, al uso de procesos y agentes físico-químicos (Alfarra et al., 2014; Franco, Beltran-Heredia, & Paterniani, 2013). para esta aplicación, el agente de remoción en esta técnica es la proteína contenida en las semillas. Los polipéptidos y glucósidos se encargan de la eliminación de iones metálicos

gracias a la formación de complejos órgano-metálicos, resultando en una eficiencia comparable con los polielectrolitos catiónicos sintéticos comúnmente usados (Ndibewu, Mnisi, Mokgalaka, & Mccrindle, 2011). Al igual que otros tratamientos de remoción de metales, la actividad de la MO depende de diversos factores propios del medio como el pH y la concentración inicial de iones metálicos, como de factores externos comúnmente manipulables por el usuario como la dosis de bioadsorbente utilizado y el tiempo de contacto entre este y el medio (Das, Vimala, & Karthika, 2008; Mataka, Sajidu, Masamba, & Mwatseteza, 2010). Además, se puede caracterizar el bioadsorbente con modelos matemáticos conocidos como isotermas de adsorción, de manera que se puede determinar el equilibrio y la capacidad de adsorción y así predecir de mejor forma el comportamiento de los iones en contacto con el bioadsorbente (A. Landázuri et al., 2016). Por tanto, se requiere del estudio de estos factores para evaluar a la MO como un material de aplicación a gran en el tratamiento de aguas.

En Quito, Ecuador, las aguas residuales no reciben un tratamiento específico para la remoción de metales y otros contaminantes emergentes y estas descargas llegan a afluentes cercanos como los ríos Machángara, San Pedro, Blanco y Chiche (A. C. Landázuri, Quevedo, Torres, Mayorga, & Gómez, 2014; Voloshenko-Rossin et al., 2015). Por tanto, estudios sobre adsorción de metales pesados son muy importantes para la aplicación de bioadsorbentes en futuras plantas de tratamiento de aguas.

El objetivo de esta investigación es evaluar los parámetros de adsorción de cadmio, hierro y plomo contenidos en agua preparada y determinar las variables cinéticas que describen este fenómeno. Esto promete ser un estudio de prefactibilidad para la aplicación en la industria y futuras plantas de tratamiento de efluentes de la ciudad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Materiales y reactivos**

Las semillas de MO se obtuvieron de la firma Ecuamoringa (Guayaquil, EC090510, Ecuador), principal productor y comercializador de la planta en el Ecuador. Las soluciones a tratar, así como la curva de calibración para espectrofotometría de absorción atómica se obtuvieron a partir de soluciones estándares de 1000 mg/L AccuStandard (New Haven, CT 06513, USA) para cadmio, de Buck Scientific (East Norwalk, CT 06855, USA) para hierro y de Inorganic Ventures (Christiansburg, VA 24073, USA) para plomo. Soluciones de ácido nítrico al 2% para análisis se prepararon a partir de ácido nítrico 69% AR/ACS de Loba Chemie (Mumbai 400 005, India). La extracción de aceite de las semillas de MO se realizó en un extractor Soxhlet SER-148 de la marca Velp Scientifica (Usmate 20865, Italia) mediante n-Hexano ACS, Reag. Ph Eur proveniente de Merck (Darmstadt 64293, Alemania). Cada tratamiento se realizó en un equipo de prueba de jarras Phipps & Bird modelo 7790-901B (Richmond, VA 23221-7475, USA). El análisis de iones metálicos se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Buck Scientific modelo 210 VGP (East Norwalk, CT 06855, USA). El agua utilizada en todas las soluciones fue ASTM de tipo I (ultrapura) Milli-Q.

### **Métodos**

#### **Tratamiento de las semillas.**

Se utilizó el tratamiento de las semillas descrito por Junior et al. (2013) modificado. Las semillas completas de MO fueron inicialmente lavadas con agua tipo I y se dejaron secar en una estufa a 60 °C durante 36 horas. Finalizado esto, se trituraron las semillas en un mortero y

se realizó la extracción de sus aceites esenciales mediante método Soxhlet. Esta extracción se realizó a 12 g de semillas trituradas con 360 mL de hexano a 68 °C durante 4 horas para una extracción completa. Finalmente, se sometió este producto a calor en una estufa a 60 °C durante 1 hora para extraer el solvente restante.

### **Estudio de cinética de adsorción y tiempo de contacto.**

Se prepararon soluciones de cadmio a 0.2 mg/L, de plomo a 2.0 mg/L y de hierro a 4.0 mg/L a partir de soluciones patrón de 1000 mg/L de cada metal. Se transfirieron 0.5 L de las soluciones a vasos de precipitación y se agregaron a cada uno 0.5 g de semillas tratadas. Se ajustó su pH a 6.0 y se agitó a 100 rpm durante 1 hora. Se tomaron alícuotas de 10 mL cada 10 minutos, incluyendo una alícuota antes del tratamiento, para su análisis posterior.

La cinética de adsorción es importante para conocer el mecanismo de adsorción en función del tiempo, al igual que la investigación de la cinética de una reacción química. Esta puede ser de pseudo-primero orden o de pseudo-segundo orden dependiendo del proceso de adsorción. Se sabe que:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

donde  $q_t$  es la capacidad de adsorción en un tiempo  $t$  en mg/g MO,  $C_0$  es la concentración inicial de iones en mg/L,  $C_e$  es la concentración de iones en el equilibrio en mg/L,  $V$  es el volumen de la solución a tratar en L, y  $m$  es la masa de adsorbente seco en g (Franco et al., 2013; Ho, 2004). Para un modelo de pseudo-primero orden se tiene:

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_t t}) \quad (2)$$

donde  $q_e$  es la capacidad de adsorción en el equilibrio en en mg/g MO,  $K_t$  es la constante de velocidad en  $\text{min}^{-1}$ , y  $t$  es el tiempo en min. Para un modelo de pseudo-segundo orden se tiene:

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{K_h q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (3)$$

donde  $K_h$  es la constante de velocidad para un modelo de pseudo-segundo orden en  $\frac{\text{g}_{\text{MO}}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$

(Franco et al., 2013).

#### **Estudio del efecto de concentración inicial de iones e isothermas de adsorción.**

Se prepararon 5 soluciones de cadmio a 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 mg/L, de plomo a 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10 mg/L, y de hierro a 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 mg/L a partir de soluciones estándar de 1000 mg/L de cada metal. Se transfirieron 0.5 L de las soluciones a vasos de precipitación y se agregaron a cada uno 0.5 g de semillas tratadas. Se ajustó su pH a 6.0 y se agitó a 100 rpm durante 1 hora. Se tomaron alícuotas antes y después del tratamiento para su posterior análisis.

El modelo de Langmuir para la isoterma de adsorción asume que la máxima capacidad de adsorción se da por la saturación de una monocapa en la superficie del adsorbente con zonas de adsorción finitas y homogéneas. En el equilibrio, este modelo predice que el número de iones se adsorben y desorben en igual número en cualquier instante de tiempo. Esta ecuación se escribe (Matouq et al., 2015; Ndibewu et al., 2011):

$$q_e = \frac{q_m b_0 C_e}{1 + b_0 C_e} \quad (4)$$

Donde  $q_m$  es la capacidad de adsorción máxima del adsorbente en mg/g MO, y  $b_0$  es una constante que relaciona la adsorción/desorción de las partículas, o energía de adsorción en L/mg. Mientras tanto, el modelo de Freundlich predice que la adsorción se da por intensidad de interacción entre moléculas adsorbidas y adsorbente y su afinidad. Este modelo es empírico, describe una función exponencial de la concentración de iones en el equilibrio y supone la formación de una multicapa de material adsorbido en la superficie del adsorbente. Su forma analítica es la siguiente (Matouq et al., 2015; Ndibewu et al., 2011):

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (5)$$

Donde  $K_f$  es una constante que indica el grado o capacidad de adsorción en  $\frac{L^n}{g_{MO} \cdot mg^{1-n}}$ , y  $n$  representa la afinidad de los iones a la superficie adsorbente o intensidad de adsorción.

#### **Estudio del efecto del pH.**

Se prepararon 5 soluciones de cadmio a 0.2 mg/L, 5 soluciones de plomo a 2.0 mg/L y 5 soluciones de hierro a 4.0 mg/L a partir de soluciones patrón 1000 mg/L de cada metal. Se transfirieron 0.5 L de las soluciones a vasos de precipitación y se agregaron a cada uno 0.5 g de semillas tratadas. Se ajustó su pH a 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 y 8.0 en cada vaso y se agitó a 100 rpm durante 1 hora. Se tomaron alícuotas antes y después del tratamiento para su posterior análisis.

#### **Estudio del efecto de dosis de adsorbente.**

Se prepararon 6 soluciones de cadmio a 0.2 mg/L, 6 soluciones de plomo a 2.0 mg/L y 6 soluciones de hierro a 4.0 mg/L a partir de soluciones patrón 1000 mg/L de cada metal. Se transfirieron 0.5 L de las soluciones a vasos de precipitación y se agregó a cada uno 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00, 1.50 y 2.00 g de semillas tratadas. Se ajustó su pH a 6.0 en cada vaso y se agitó a



100 rpm durante 1 hora. Se tomaron alícuotas antes y después del tratamiento para su posterior análisis.

#### **Estudio sobre agua multicomponente.**

Se preparó una solución con un contenido de cadmio a 0.2 mg/L, plomo a 2.0 mg/L y hierro a 4.0 mg/L con soluciones patrón de 1000 mg/L de cada metal. Se transfirió 0.5 mL de la solución a un vaso de precipitación y se agregó 0.5 mg de semillas tratadas. Se ajustó su pH a 6.0 y se agitó a 100 rpm durante 1 hora. Se tomaron alícuotas antes y después del tratamiento para su posterior análisis.

#### **Análisis.**

El análisis de los metales contenidos en las soluciones se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica utilizando curvas de calibración con estándares certificados y siguiendo el procedimiento de análisis propuesto por el fabricante. Para todos los metales se usó una llama de aire/acetileno y lámparas de cátodo hueco para cada elemento de la misma casa fabricante del espectrofotómetro. El porcentaje de remoción de metales se realizó utilizando la siguiente ecuación, donde  $C_0$  es la concentración inicial de iones en mg/L, y  $C_e$  es la concentración en el equilibrio en mg/L (Karnib et al., 2014):

$$\text{Porcentaje de remoción} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (6)$$

Se utilizó un diseño experimental de tipo DBCA (Diseño en Bloque Completamente al Azar). Todos los experimentos fueron realizados por triplicado. La aleatorización se realizó en Minitab 17 (State College, PA 16801-3210, USA). En el mismo programa se desarrolló un análisis estadístico para todos los experimentos mediante Análisis de Varianza (ANOVA) y las

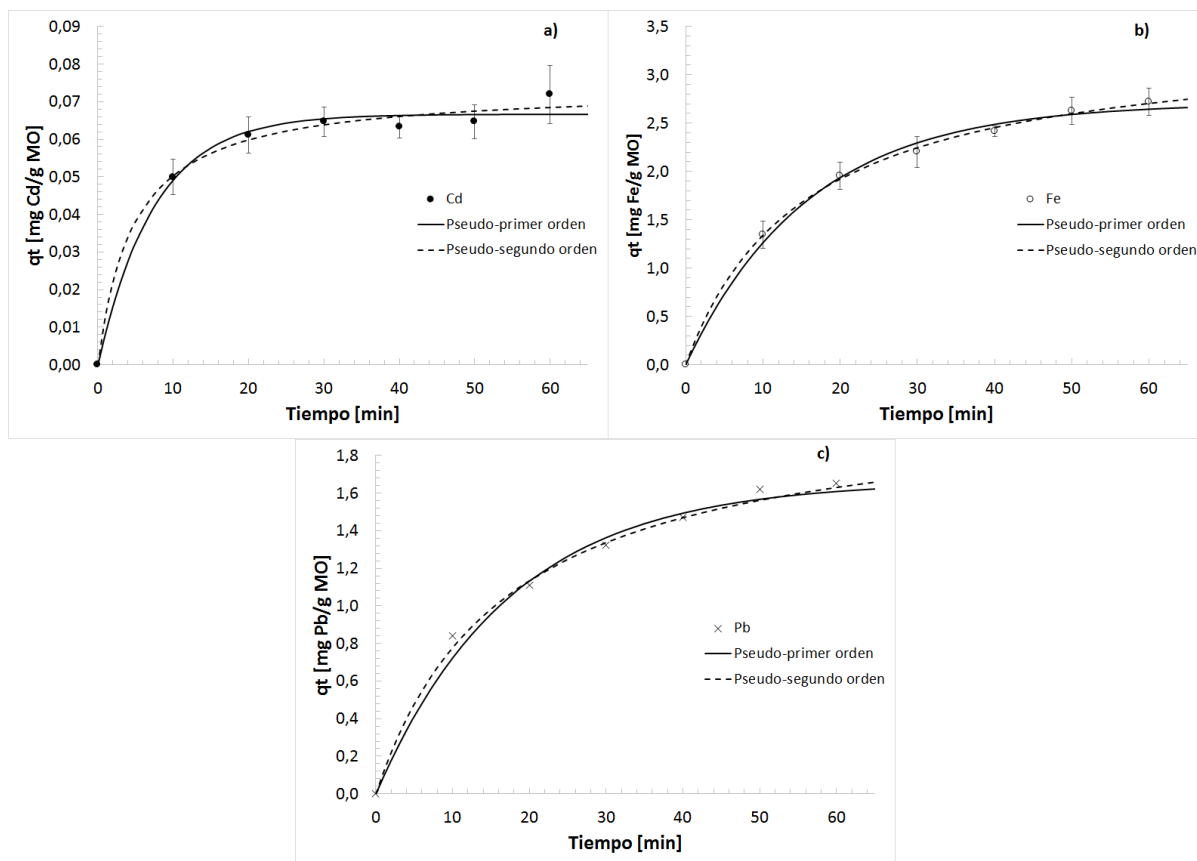
medias se compararon por medio de la prueba Tukey de comparación múltiple *post-hoc*. El intervalo de confianza utilizado fue del 95%.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se realizaron experimentos para cadmio, plomo y hierro sobre el estudio de cinética de adsorción, efecto de tiempo de contacto, efecto de concentración inicial de iones, efecto de pH, efecto de dosis de adsorbente e isothermas de adsorción.

### **Cinética de adsorción**

Uno de los objetivos fundamentales de esta investigación fue encontrar los parámetros correspondientes a los modelos que predicen el mecanismo de adsorción de metales pesados por parte de la MO. En efecto, el primer estudio realizado fue la cinética de adsorción. Como se puede observar en la Figura 2a y en la Tabla 1, se encontró que la mejor cinética para la adsorción de cadmio fue la de pseudo-segundo orden. Probablemente este ajuste se deba a las distintas interacciones de entre la superficie del adsorbente y los iones de cadmio presentes. Puede suponerse que la interacción entre cationes existe y se desarrolla una multicapa de iones en la superficie. De igual manera ocurre con el plomo y el hierro. Por tanto, el porcentaje de remoción de iones metálicos aumenta en el tiempo debido a fenómenos de adsorción/desorción que existen. Con estos resultados se puede suponer el siguiente mecanismo: al primer contacto de la superficie adsorbente con la solución, existe una mayor adsorción debido a la disponibilidad de superficie, y conforme avanza el tiempo, esta se vuelve menos disponible aunque el fenómeno de desorción regenera parte de la superficie, y por tanto, se llega al punto de saturación de la superficie en menos tiempo (Alias, Mohamad, Alias, & Kamal, 2010).



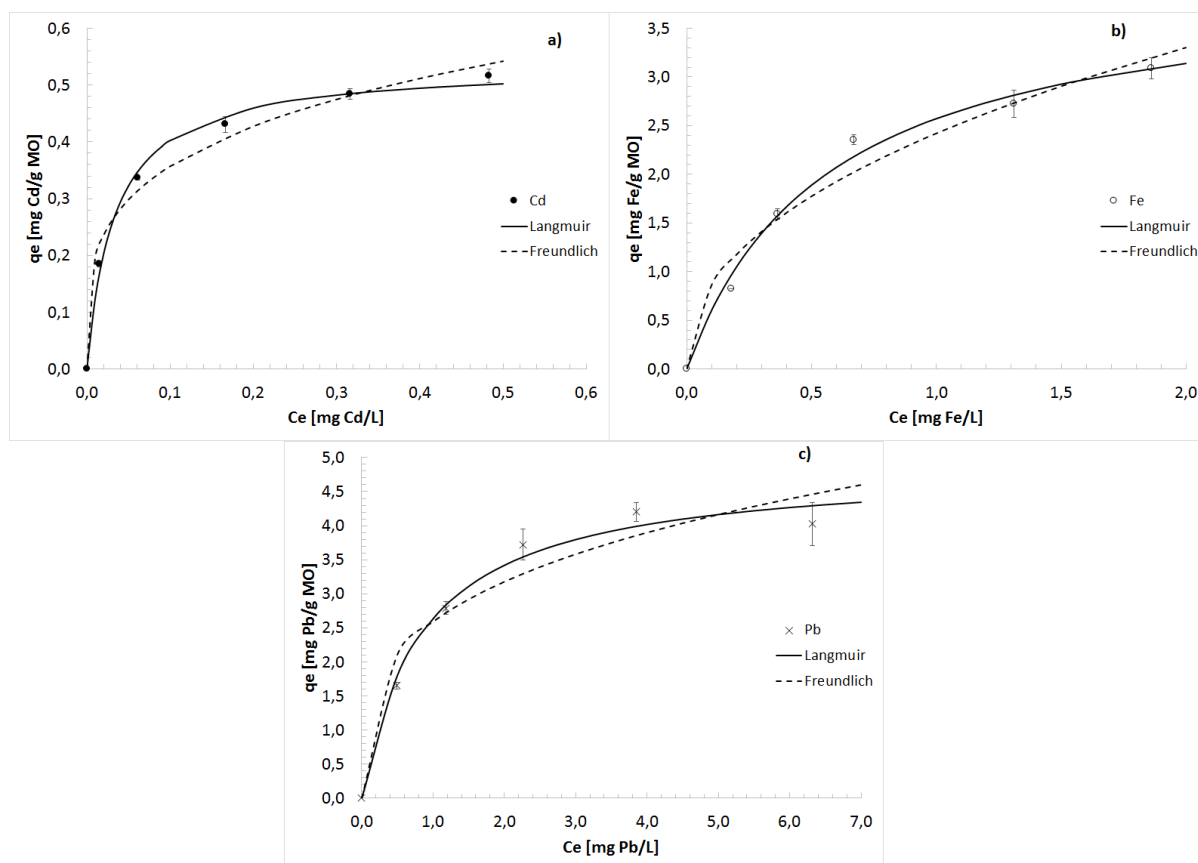
**Figura 2.** Modelos cinéticos de adsorción para cadmio (a), hierro (b) y plomo (c).

**Tabla 1.** Parámetros de modelos cinéticos de pseudo-primer y segundo orden para Cd, Fe y Pb.

Modelo cinético	Metal		
	Cd	Fe	Pb
<b>Cinética de pseudo-primer orden</b>			
$q_e$	0.066	0.029	1.669
$k_1$	0.134	0.063	0.059
$R^2$	0.988	0.995	0.990
<b>Cinética de pseudo-segundo orden</b>			
$q_e$	0.073	3.398	2.106
$k_2$	2.938	0.019	0.028
$R^2$	0.991	0.999	0.996

## Isotermas de adsorción

Se puede notar una tendencia marcada de los datos que se ajustan a isotermas de Langmuir para todos los metales en estudio basándose en la información del coeficiente de determinación,  $R^2$ , en la Tabla 2. Esto supone un fenómeno de adsorción de una monocapa de iones metálicos en la superficie del material absorbente, confirmando lo supuesto por la presencia de una cinética de pseudo-segundo orden. En efecto, existe una mayor facilidad de adsorción/desorción en este tipo de isotermas debido a que en ciertas zonas finitas del material no existe una atracción lo suficientemente fuerte entre iones/superficie y por lo tanto, cuando los iones intentan agruparse en multicapas, se desprenden y se recupera la uniformidad de iones depositados (Buasri, Chaiyut, Tapang, Jaroensin, & Panphrom, 2012; Matouq et al., 2015).



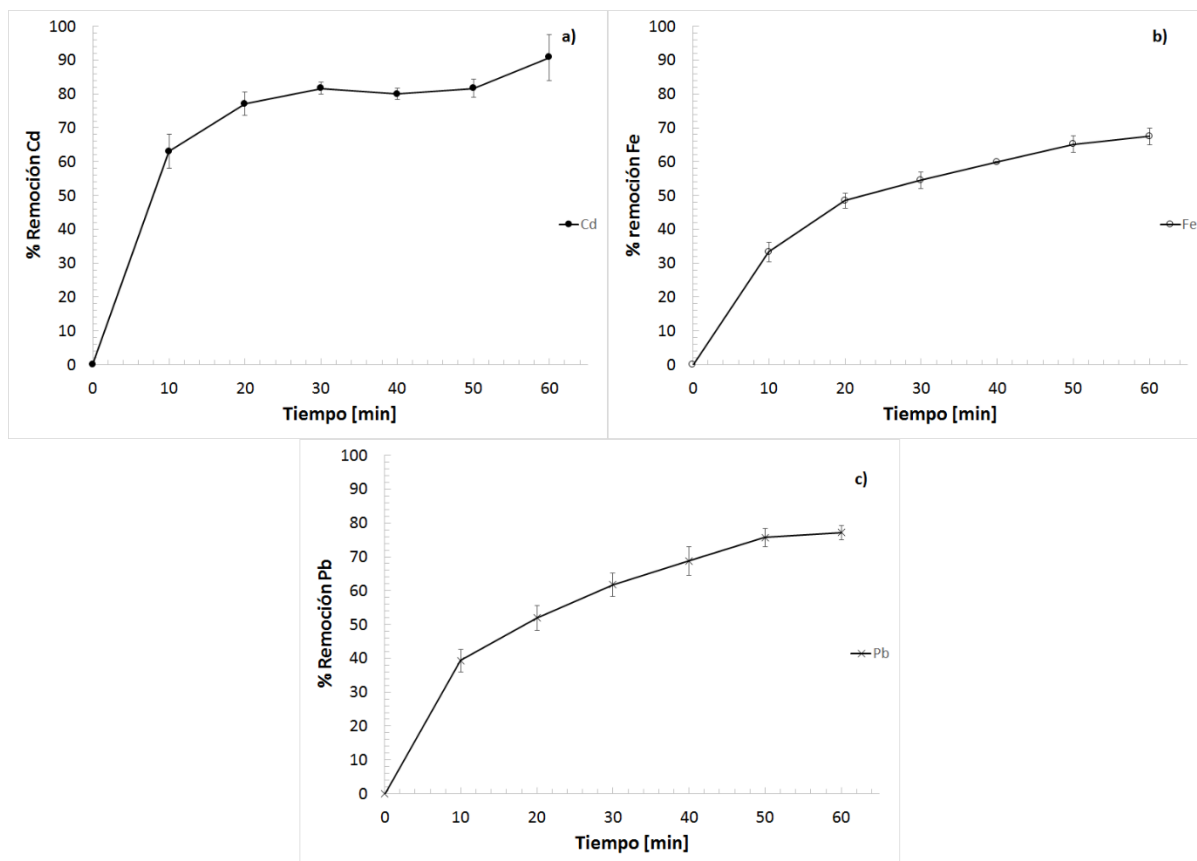
**Figura 3.** Isotermas de adsorción para cadmio (a), hierro (b) y plomo (c).

**Tabla 2.** Parámetros de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich para Cd, Fe y Pb.

Isoterma de adsorción	Metal		
	Cd	Fe	Pb
<b>Isoterma de Langmuir</b>			
$q_m$	0.535	4.026	4.870
$b_0$	30.35	1.768	1.179
$R^2$	0.995	0.992	0.987
<b>Isoterma de Freundlich</b>			
$K_f$	0.648	2.424	2.594
$n$	3.858	2.234	3.392
$R^2$	0.987	0.970	0.948

### Efecto del tiempo de contacto

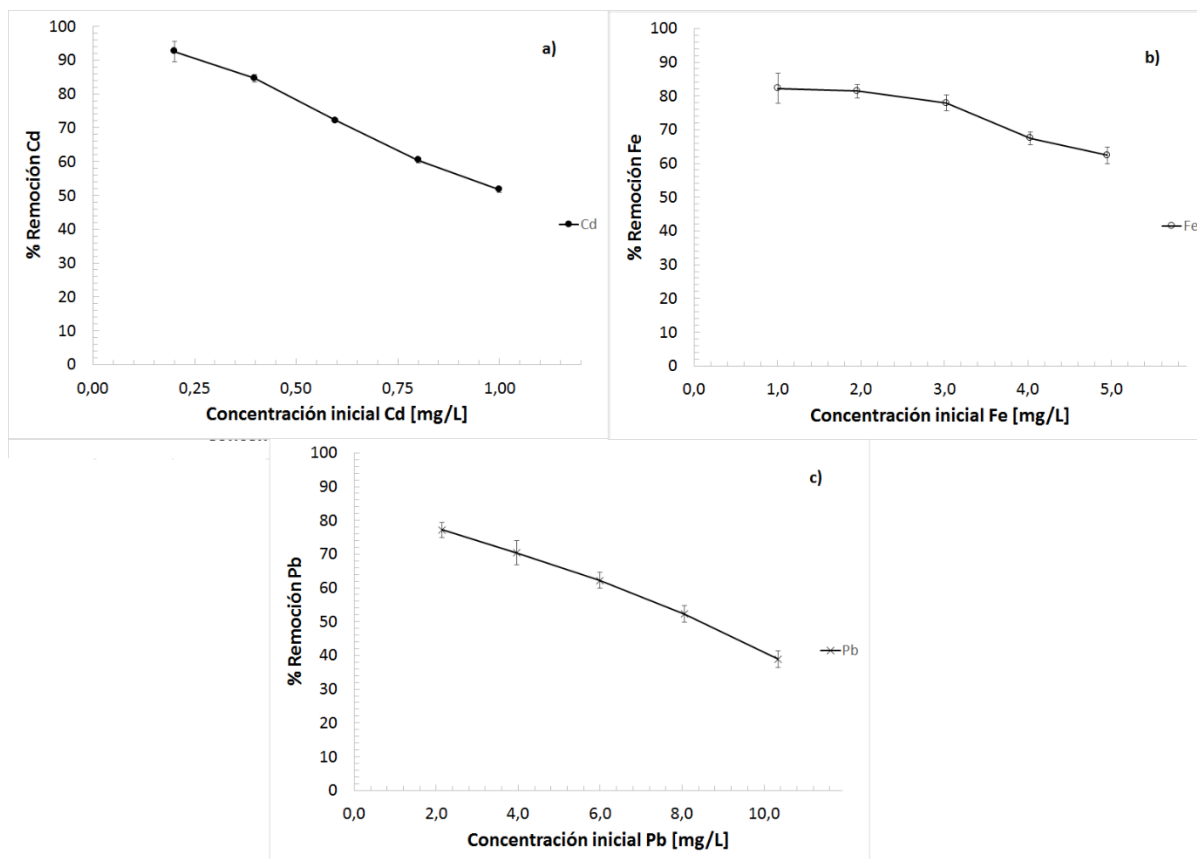
Se pudo observar que para Fe y Pb se llega a un porcentaje de adsorción constante después de aproximadamente 50 minutos, aunque para Cd aumentó alrededor de un 10% de remoción después de este tiempo (Figura 4). El intervalo de tiempo escogido (0 – 60 min) no es suficiente para concluir que al final de este tiempo se consiga la capacidad máxima de adsorción. Este tiempo de contacto podría ser mayor de acuerdo a la tendencia marcada. Alias et al., (2010), sostienen que la razón de captación de nuevos iones en la superficie del adsorbente está controlada por la razón del transporte desde el exterior hacia el interior de dichas superficies, que son localizadas y finitas como lo describe el modelo de Langmuir. Adicionalmente, el empobrecimiento de la capacidad de adsorción de la MO ocurre por la disminución de zonas de adsorción. Madzvamuse, Kugara, & Shumba, (2015), afirman que incluso que existe una hidrólisis fuerte en la superficie adsorbente debido a la relativa alta densidad de carga y radios pequeños de los metales pesados en estudio. Esto deriva en una competencia entre la solución y las zonas de contacto. Finalmente, estos últimos autores mencionan que, para el caso del Cd, el aumento de capacidad de remoción de este puede implicarla existencia de un grado de hidrolización menor en comparación con los otros metales.



**Figura 4.** Efecto de tiempo de contacto MO-solución de iones de Cd (a), Fe (b) y Pb (c).

### Efecto de la concentración inicial de iones metálicos

Se pudo determinar que el efecto de la concentración de iones de Pb y Cd es significativo para la remoción de estos metales del agua. Se puede observar que para Cd existe una mayor remoción cuando la concentración de este es de apenas 0.2 mg/L (~90% de remoción), para el Fe existe mayor remoción cuando la concentración inicial es de 1.0, mientras que para Pb existe una mayor remoción cuando la concentración es de 4.0 mg/L (~75% de remoción). Se observó una tendencia al decrecimiento de la capacidad de adsorción de la MO conforme crece la concentración de iones inicial en el agua para todos los metales (Figura 5).



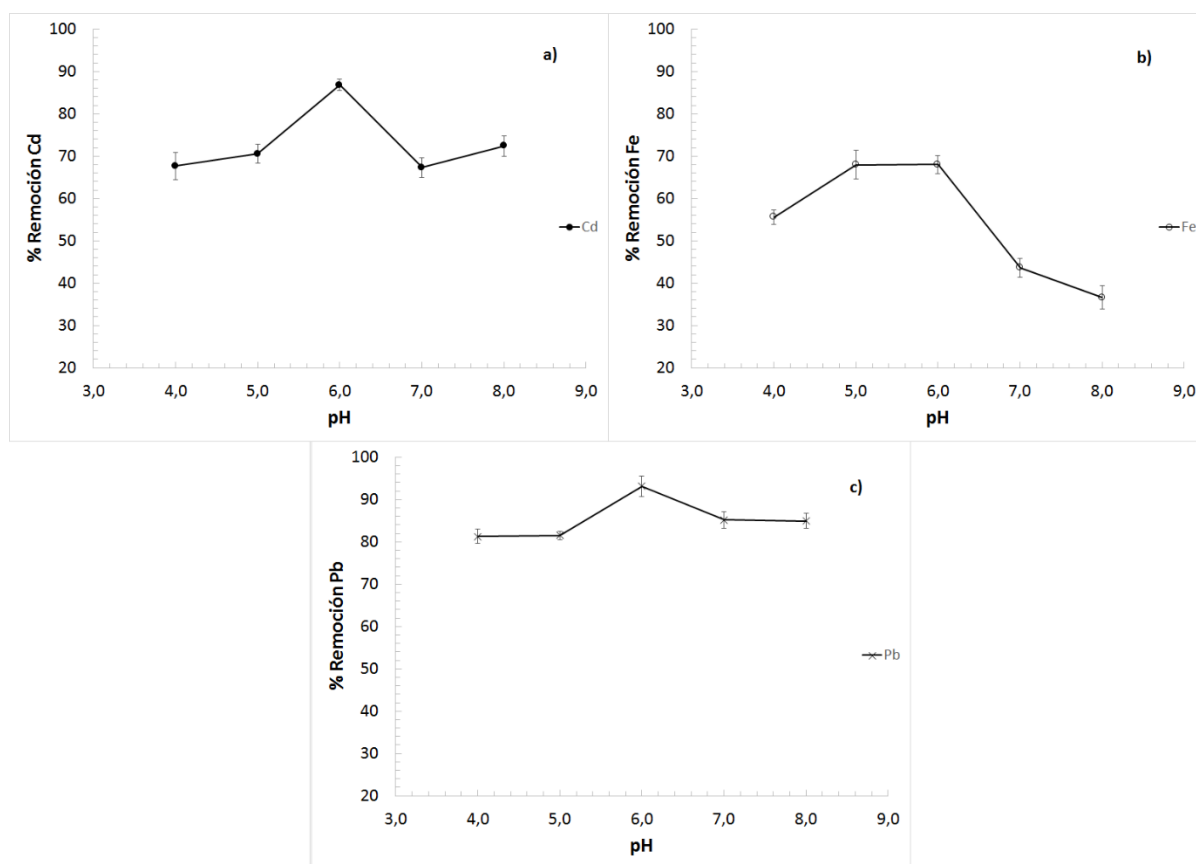
**Figura 5.** Efecto de la concentración inicial de iones para Cd (a), Fe (b) y Pb (c).

## Efecto del pH

Un factor con influencia significativa en la adsorción de metales es el pH. Para Cd, se puede notar que existe mayor adsorción a un pH ligeramente ácido (~90% de remoción), al igual que la interacción se da para Pb (~90% de remoción). Esto es conveniente ya que puede ser deseable la utilización de MO en plantas de tratamiento de aguas residuales en las cuales el pH de la descarga suele ser ligeramente ácido, entre 5.5 a 7.5 en la escala de pH, debido a que no requiere un tratamiento de neutralización previo.

La medición del pH de las muestras al final del tratamiento del agua con MO mostró que la semilla es un buen amortiguador químico que eleva o descende el pH de las soluciones a un valor de  $6.0 \pm 0.2$ . Esto se debe al punto de carga cero o  $pH_{PZC}$ , correspondiente a pH 4.4 para

la MO. Según Junior et al. (2013), a un pH superior al punto de  $pH_{PZC}$  y menor al neutro (7.0), los iones se mantienen solubilizados en el agua y se favorece su movilidad, mientras que la capacidad adsorptiva disminuye a pH básico, es decir, mayor a 7.0. Así sucede con el Fe, cuya remoción es menor a pH básico que a pH ácido o neutro ya que la sal de Fe en la solución  $[Fe(NO_3)_2]$  se disocia con en menor proporción en pH básico debido a la naturaleza ácida de dicha sal. Adicionalmente, el contenido de Fe que existe en las semillas de MO limita la adsorción de este metal por estar ligeramente saturadas las zonas de adsorción. El contenido de Fe de una plantación a otra, y suele ser de entre 93.9 mg/kg hasta 223.130 mg/kg, o incluso más (Ananias et al., 2016; Limmatvapirat et al., 2015). Este contenido es mayor al de los otros metales en estudio, por lo que esta limitación puede no existir con Cd y Pb.

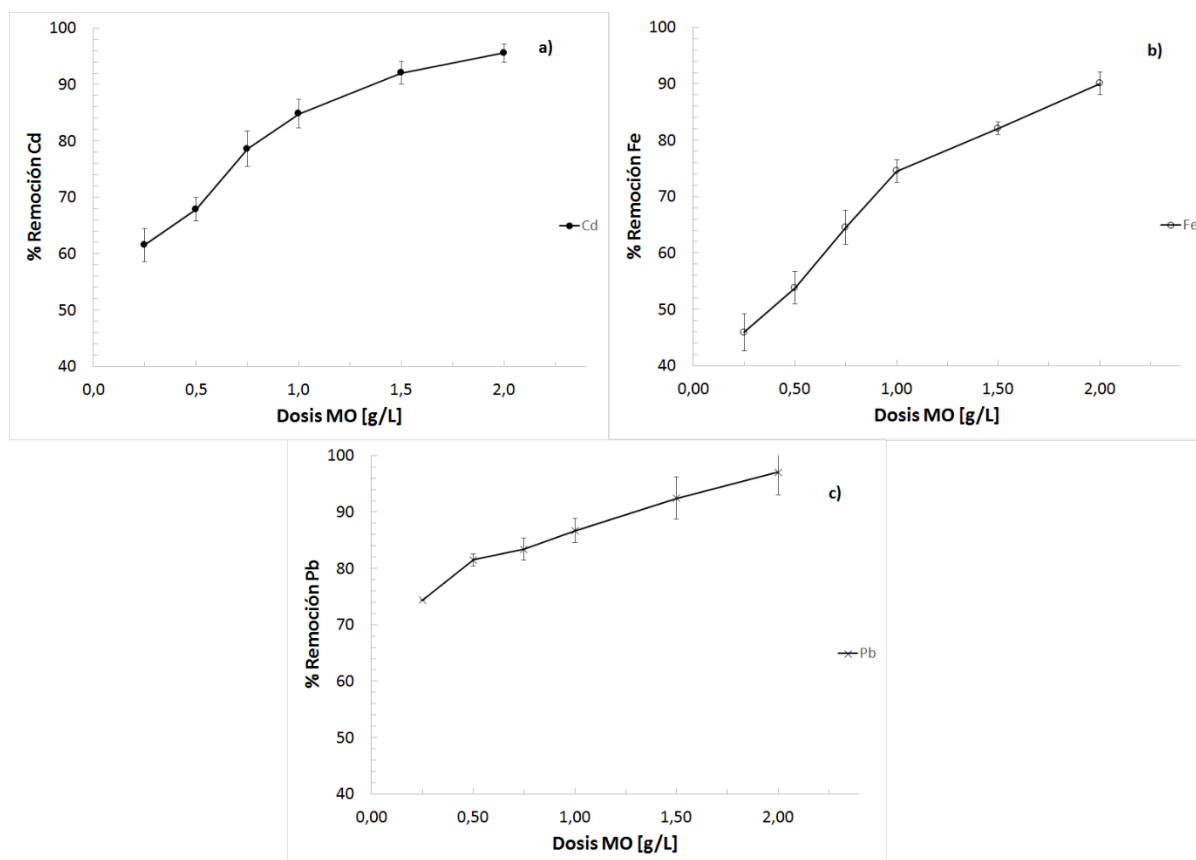


**Figura 6.** Efecto del pH en la adsorción con MO de C (a), Fe (b) y Pb (c).



## Efecto de la dosis de MO

Del estudio se puede concluir que a mayor dosis de MO se agregue, mayor será la remoción de iones. Por tanto, utilizando una dosis de MO es superior al de los tratamientos previos (1.0 g/L), la remoción de metales es mayor al 95%. Es así que, el mejor tratamiento se consigue cuando la dosis de MO es de 2.0 g/L (Figura 7). Este resultado es interesante para evaluar el riesgo económico en el cambio de tecnología al uso de la MO en plantas industriales de tratamiento de agua residuales. Adicionalmente, el experimento muestra una tendencia a aumentar el porcentaje de remoción de iones conforme aumenta la dosis de MO. Un estudio más profundo de este factor podría ayudar a evaluar su efecto en el mecanismo de la adsorción.



**Figura 7.** Efecto de la dosis de MO en la adsorción de Cd (a), Fe (b) y Pb (c).

En la Tabla 3 se puede encontrar el resumen de los mejores resultados obtenidos en función del nivel del factor estudiado. Se han escogido estos resultados después de la comparación de medias mediante la prueba de Tukey (intervalo de confianza del 95%).

**Tabla 3.** Cuadro de resumen de resultados de la experimentación de los factores.

Factor	Cd		Fe		Pb	
	Nivel Factor	% Remoción	Nivel Factor	% Remoción	Nivel Factor	% Remoción
Tiempo de contacto	60.0 min	90.8	60.0 min	67.5	60.0 min	77.1
Concentración inicial iones	0.20 mg/L	92.6	1.00 mg/L	82.2	2.00 mg/L	77.1
pH	6.00	86.8	6.00	68.0	6.00	93.1
Dosis MO	2.00 g/L	95.6	2.00 g/L	90.4	2.00 g/L	97.0

### Tratamiento de agua multicomponente con MO

Con el objeto de comprobar qué es lo que ocurre si se presentan dos o más metales en el agua, se sometió la adsorción con MO en agua multicomponente. El resultado puede observarse en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Porcentaje de remoción de Cd, Fe y Pb con MO en agua multicomponente.

Metal	% Remoción
Cd	16.28 ± 5.86
Fe	8.73 ± 3.04
Pb	10.77 ± 4.92

Puede observarse cómo el porcentaje de remoción es afectado significativamente por la presencia de distintos iones metálicos en el agua. En este experimento, la remoción de metales ha disminuido sustancialmente a valores menores al 20% de remoción. Esto se debe a la

competencia entre los iones y con la superficie del adsorbente. Parece que existe mayor afinidad al Cd, y puede que esto se deba a la baja cantidad de este metal en la semilla desde su cosecha. De igual manera, el metal que en mayor concentración se encuentra en las semillas recolectadas es el Fe y este se adsorbe en menor proporción. Ndibewu et al., (2011), sugiere que el intercambio iónico puede ser decisivo en esta situación, además de la competencia debido a la carga iónica. Estudios anteriores reportan que existen diversas causas de competencia entre iones, y por consiguiente una mayor afinidad de adsorción: valores más altos de número atómico, peso, electronegatividad, potencial eléctrico y tamaño iónico, entre otros (Ahalya, Ramachandra, & Kanamadi, 2003; Matouq et al., 2015; Volesky & Holan, 1995). Se requiere un estudio detallado variando niveles de concentración de iones para determinar la viabilidad del uso de MO en plantas de tratamiento.

## CONCLUSIONES

Un novedoso material para la remoción de metales pesados por medio de adsorción fue utilizado en este estudio: semillas de *Moringa oleifera* Lam. Se encontró que el bioadsorbente posee un alto rendimiento y capacidad de remoción de Cd, Fe y Pb en agua preparada. Fueron identificadas las mejores condiciones para el tratamiento de agua con presencia de estos metales pesados con MO en base a las pruebas de significación estadística: tiempo de contacto agua-adsorbente de una hora, pH 6.0, dosis de MO 2.0 g/L y concentración inicial de Cd 0.2 mg/L, Fe 1.0 mg/L y Pb 2.0 mg/L. Para todos estos parámetros se encontró una remoción de 95.6% de Cd, 90.4% para Fe y 97.0% para Pb. La carga de iones en el equilibrio  $q_e$ , que describe la cantidad de iones adsorbidos por MO y permite determinar la cantidad necesaria de MO para remover un determinado contenido de metales fue de 0.106 mg Cd/g MO, 1.850 mg Fe/g MO y 1.156 mg Pb/g MO para el mejor tratamiento. En la prueba con agua multicomponente se

encontró que la MO disminuía su capacidad de remoción de metales debido a la competencia entre iones por la afinidad a las zonas activas de adsorción y en consecuencia el porcentaje de adsorción descendía hasta el 16.3% para Cd, 8.73% para Fe y 10.8% para Pb. Todos los metales se ajustaron a un modelo de isoterma de Langmuir y siguieron una cinética de pseudo-segundo orden, resultados que son respaldados por la literatura consultada. Este primer estudio es un punto de referencia para otros futuros proyectos con los cuales se puede poner a prueba el método de remoción de metales pesados con MO como una nueva tecnología a utilizarse en aplicaciones industriales en el tratamiento de aguas residuales.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a Dios por la fuerza y la fe que ha cultivado en mí, por el camino correcto en el que me ha puesto y una adecuada conducción de vida.

Agradezco de todo corazón a mis padres, Edison y Nidia, y mi hermano, David, por su incondicional paciencia y apoyo durante todos estos años, por su compañía y su orientación por la vida.

Agradezco de manera muy especial a mi tutor de tesis, Andrea C. Landázuri, PhD, por todo su conocimiento impartido, por su compañía durante los años de carrera y por sus consejos, tanto en la vida de estudiante como en lo personal, y finalmente por su dirección al realizar este trabajo de titulación.

Agradezco a la Universidad San Francisco de Quito, en especial al Departamento de Ingeniería Química, a los maestros y compañeros de la carrera por todos la sabiduría y paciencia para

conmigo, por el apoyo y su amistad brindada estos años. De igual forma, agradezco al USFQ Collaboration Grant 2016 por el apoyo económico durante la realización de esta investigación.

Finalmente agradezco a mis familiares y amigos por la comprensión, paciencia y su caminar junto a mí en esta etapa tan importante en mi vida.

## REFERENCIAS

- Ahalya, N., Ramachandra, T. V., & Kanamadi, R. D. (2003). Biosorption of Heavy Metals. *Research Journal Of Chemistry And Environment*, 7(4), 71–79.
- Alfarra, R. S., Ali, N. E., & Yusoff, M. M. (2014). Removal of heavy metals by natural adsorbent: review. *International Journal of Biosciences*, 6655, 130–139. <http://doi.org/10.12692/ijb/4.7.130-139>
- Alias, N. Z., Mohamad, N., Alias, S. H., & Kamal, M. L. (2010). Removal of Iron ( Fe ) by Adsorption using Activated Carbon Moringa oleifera ( ACMO ) in Aqueous Solution. *Jurnal Intelek*, 7(2), 22–28.
- Ananias, N. K., Kandawa-schulz, M., Hedimbi, M., Kwaambwa, H. M., Tutu, H., Makita, C., & Chimuka, L. (2016). Comparison of metal content in seeds of Moringa ovalifolia and Moringa oleifera, 10(September), 172–177. <http://doi.org/10.5897/AJFS2016.1421>
- Araújo, C. S. T., Alves, V. N., Rezende, H. C., Almeida, I. L. S., De Assunção, R. M. N., Tarley, C. R. T., ... Coelho, N. M. M. (2010). Characterization and use of Moringa oleifera seeds as biosorbent for removing metal ions from aqueous effluents. *Water Science and Technology*, 62(9), 2198–2203. <http://doi.org/10.2166/wst.2010.419>
- Azizi, S., Kamika, I., & Tekere, M. (2016). Evaluation of Heavy Metal Removal from Wastewater in a Modified Packed Bed Biofilm Reactor, 1–13. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0155462>
- Bailey, S., Olin, T., Bricka, R. M., & Adria, D. D. (1999). A Review of Ppotentially Low-cost Ssorbents for Heavy Metals. *Water Research*, 33(11), 2469–2479. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00475-8](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00475-8)
- Bhatnagar, M., Parwani, L., Sharma, V., Ganguli, J., & Bhatnagar, A. (2013). Hemostatic, antibacterial biopolymers from Acacia arabica (Lam.) Willd. and Moringa oleifera (Lam.) as potential wound dressing materials. *Indian Journal of Experimental Biology*,

51(10), 804–810.

- Bichi, M. H. (2013). A Review of the Applications of *Moringa oleifera* Seeds Extract in Water Treatment. *Civil and Environmental Research*, 3(8), 1–11.
- Buasri, A., Chaiyut, N., Tapang, K., Jaroensin, S., & Panphrom, S. (2012). Removal of  $\text{Cu}^{2+}$  from Aqueous Solution by Biosorption on Rice Straw - an Agricultural Waste Biomass. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(1), 10–14.
- Das, N., Vimala, R., & Karthika, P. (2008). Biosorption of heavy metals – An overview. *Indian Journal of Biotechnology*, 7(April), 159–169.
- Duke, J. A. (1983). *Moringa Oleifera* Lam. *Handbook of Energy Crops*.
- Eloka-Eboka, A. C., & Inambao, F. L. (2016). Hybridization of feedstocks—A new approach in biodiesel development: A case of *Moringa* and *Jatropha* seed oils. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(11), 1495–1502. <http://doi.org/10.1080/15567036.2014.934413>
- Franco, M., Beltran-Heredia, J., & Paterniani, J. E. S. (2013). Use of Alginate-*Moringa oleifera* Beads on Cu (II) and Cd (II) Adsorption from Aquatic Systems. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 4(6), 373–376. <http://doi.org/10.7763/IJCEA.2013.V4.328>
- Gopalakrishnan, L., Doriya, K., & Kumar, D. S. (2016). *Moringa Oleifera*: A Review on Nutritive Importance and its Medicinal Application. *Food Science and Human Wellness*, 5(2), 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.04.001>
- Ho, Y.-S. (2004). Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *Scientometrics*, 59(1), 171–177.
- Junior, A. C. G., Meneghel, A. P., Rubio, F., Strey, L., Dragunski, D. C., Coelho, G. F., ... Coelho, G. F. (2013). Applicability of *Moringa oleifera* Lam. pie as an adsorbent for removal of heavy metals from waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E*

*Ambiental*, 17(1), 94–99. <http://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100013>

- Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., & Olama, Z. (2014). Heavy Metals Removal Using Activated Carbon , Silica and Silica Activated Carbon Composite. *Energy Procedia*, 50, 113–120. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>
- Landázuri, A. C., Quevedo, J., Torres, M. C., Mayorga, F., & Gómez, L. (2014). Muestreo Y Caracterización de la Descarga “Central Iñaquito”, Representativa de la Cuenca Urbana de la Quebrada El Batán : Quito – Ecuador. In *Programa para la Descontaminación de los Ríos de Quito*.
- Landázuri, A., Vargas, M., Cahuasquí, J., Egas, D., & Lagos, A. (2016). *Metal adsorption in aqueous media using Moringa Oleifera seeds produced in Ecuador as an alternative method for water treatment*. Quito.
- Limmatvapirat, C., Limmatvapirat, S., Charoenteeraboon, J., Wessapan, C., Kumsum, A., Jenwithayaamornwech, S., & Luangthuwapranit, P. (2015). Comparison of Eleven Heavy Metals in Moringa Oleifera Lam. Products. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 77(4), 485–490.
- Madzvamuse, A., Kugara, J., & Shumba, T. (2015). A Remediation Study Using Moringa oliefera Seed ( Uncarbonised and Carbonised ) for the Adsorption of Chromium , Cadmium and Lead from Synthetic Water. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 7(3), 110–121. <http://doi.org/10.9734/IRJPAC/2015/16195>
- Mataka, L. M., Sajidu, S. M. I., Masamba, W. R. L., & Mwatseteza, J. F. (2010). Cadmium sorption by Moringa stenopetala and Moringa oleifera seed powders : Batch , time , temperature , pH and adsorption isotherm studies. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2(3), 50–59.
- Matouq, M., Jildeh, N., Qtaishat, M., Hindiyeh, M., & Al Syouf, M. Q. (2015). The adsorption kinetics and modeling for heavy metals removal from wastewater by Moringa pods.



*Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 775–784.

<http://doi.org/10.1016/j.jece.2015.03.027>

- Ndibewu, P. P., Mnisi, R. L., Mokgalaka, S. N., & Mccrindle, R. I. (2011). Heavy Metal Removal in Aqueous Systems Using *Moringa oleifera*: A Review. *Journal of Materials Science and Engineering*, 1, 843–853. Retrieved from david publishing
- Ngah, W. S. W., & Hanafiah, M. A. K. M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents : A review, 99, 3935–3948. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.011>
- Olson, M. E., & Fahey, J. W. (2011). *Moringa oleifera*: Un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(4), 1071–1082. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.7550/rmb.28737>
- Ravikumar, K., & K, P. S. a. (2013). Heavy Metal Removal from Water using *Moringa oleifera* Seed Coagulant and Double Filtration. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(5), 10–13. Retrieved from <http://www.ijser.org>
- Volesky, B., & Holan, Z. R. (1995). Biosorption of Heavy Metals. *Biotechnology Progress*, 11(3), 235–250. <http://doi.org/10.1021/bp00033a001>
- Voloshenko-Rossin, A., Gasser, G., Cohen, K., Gun, J., Cumbal-Flores, L., Parra-Morales, W., ... Lev, O. (2015). Emerging pollutants in the Esmeraldas watershed in Ecuador: discharge and attenuation of emerging organic pollutants along the San Pedro–Guayllabamba–Esmeraldas rivers. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 17(1), 41–53. <http://doi.org/10.1039/C4EM00394B>
- Warra, A. A. (2014). A Review of *Moringa Oleifera* Lam Seed Oil Prospects in Personal Care Formulations. *JOURNAL OF PHARMACEUTICS AND NANOTECHNOLOGY*, 2(3), 31–34.

# MATERIAL SUPLEMENTARIO

## Análisis estadístico para Cd

### Efecto del tiempo de contacto

#### *ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales)*

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
t [min]	7	0. 10. 20. 30. 40. 50. 60

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
t [min]	6	13,624	2,2707	19,44	0,000
Error	14	1,635	0,1168		
Total	20	15,260			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,341754	89,28%	84,69%	75,89%

Medias

t [min]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	3	-1,380	0,000	( -1,803. -0,957)
10	3	-0,8070	0,0972	(-1,2302. -0,3838)
20	3	-0,247	0,270	( -0,670. 0,176)
30	3	0,392	0,390	( -0,032. 0,815)
40	3	0,058	0,311	( -0,365. 0,481)
50	3	0,400	0,523	( -0,023. 0,823)
60	3	1,274	0,462	( 0,850. 1,697)

Desv.Est. agrupada = 0,341754

### **Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson)**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

t [min]	N	Media	Agrupación
60	3	1,274	A
50	3	0,400	A B
30	3	0,392	A B
40	3	0,058	B C
20	3	-0,247	B C
10	3	-0,8070	C D
0	3	-1,380	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### **Efecto de la concentración inicial de iones**

#### **ANOVA**

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
C0	5	0,200. 0,398. 0,597. 0,800. 1,000

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
C0	4	3384,09	846,024	353,65	0,000
Error	10	23,92	2,392		
Total	14	3408,02			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,54670	99,30%	99,02%	98,42%

Medias

C0	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0,200	3	92,56	3,02	( 90,57. 94,55)
0,398	3	84,635	1,148	(82,645. 86,624)
0,597	3	72,144	0,562	(70,154. 74,134)
0,800	3	60,455	0,766	(58,465. 62,445)
1,000	3	51,683	0,772	(49,693. 53,673)

Desv.Est. agrupada = 1,54670

## Comparación en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

C0	N	Media	Agrupación
0,200	3	92,56	A
0,398	3	84,635	B
0,597	3	72,144	C
0,800	3	60,455	D
1,000	3	51,683	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

## Efecto del pH

### ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales)

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
pH	5	4. 5. 6. 7. 8

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	4	13,045	3,2612	7,64	0,004
Error	10	4,271	0,4271		
Total	14	17,316			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,653529	75,33%	65,47%	44,50%

Medias

pH	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4	3	-0,815	1,001	(-1,656. 0,026)
5	3	0,062	0,589	(-0,778. 0,903)
6	3	1,6841	0,0619	(0,8434. 2,5248)
7	3	-0,840	0,805	(-1,680. 0,001)
8	3	0,443	0,369	(-0,397. 1,284)

Desv.Est. agrupada = 0,653529

### **Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson)**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

pH	N	Media	Agrupación
6	3	1,6841	A
8	3	0,443	A B
5	3	0,062	A B
4	3	-0,815	B
7	3	-0,840	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### **Efecto de la dosis de MO**

#### **ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales)**

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Dosis MO [g/L]	7	0,00. 0,25. 0,50. 0,75. 1,00. 1,50. 2,00

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Dosis MO [g/L]	6	21,0382	3,50637	57,44	0,000
Error	14	0,8546	0,06105		
Total	20	21,8928			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,247075	96,10%	94,42%	91,22%

Medias

Dosis MO [g/L]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0,00	3	-1,710	0,000	( -2,016. -1,404)
0,25	3	-0,6710	0,0771	(-0,9769. -0,3650)
0,50	3	-0,4943	0,0624	(-0,8003. -0,1884)
0,75	3	-0,0945	0,1467	(-0,4004. 0,2115)
1,00	3	0,241	0,174	( -0,065. 0,547)
1,50	3	0,901	0,292	( 0,595. 1,207)
2,00	3	1,589	0,530	( 1,283. 1,894)

Desv.Est. agrupada = 0,247075

### ***Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson)***

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Dosis MO [g/L]	N	Media	Agrupación
2,00	3	1,589	A
1,50	3	0,901	A B
1,00	3	0,241	B C
0,75	3	-0,0945	C D
0,50	3	-0,4943	D
0,25	3	-0,6710	D
0,00	3	-1,710	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

## **Análisis estadístico para Fe**

### **Efecto del tiempo de contacto**

#### ***ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales)***

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
t [min]	7	0. 10. 20. 30. 40. 50. 60

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
t [min]	6	17,5051	2,91752	46,88	0,000
Error	14	0,8713	0,06224		
Total	20	18,3764			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,249470	95,26%	93,23%	89,33%

Medias

t [min]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	3	-1,503	0,000	( -1,812. -1,194)
10	3	-0,8377	0,0743	(-1,1466. -0,5287)
20	3	-0,3440	0,0950	(-0,6529. -0,0351)
30	3	-0,0526	0,1425	(-0,3616. 0,2563)
40	3	0,2924	0,0202	(-0,0165. 0,6013)
50	3	0,893	0,339	( 0,584. 1,202)
60	3	1,369	0,535	( 1,060. 1,678)

Desv.Est. agrupada = 0,249470

### **Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson)**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

t [min]	N	Media	Agrupación
60	3	1,369	A
50	3	0,893	A B
40	3	0,2924	B C
30	3	-0,0526	C
20	3	-0,3440	C D
10	3	-0,8377	D E
0	3	-1,503	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### **Efecto de la concentración inicial de iones**

#### **ANOVA**

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
C_inicial [mg/L]	5	1,006. 1,954. 3,024. 4,034. 4,951

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
C_inicial [mg/L]	4	945,97	236,492	29,96	0,000
Error	10	78,93	7,893		
Total	14	1024,90			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2,80938	92,30%	89,22%	82,67%

Medias

C_inicial [mg/L]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
1,006	3	82,22	4,46	(78,61. 85,84)
1,954	3	81,42	2,06	(77,81. 85,04)
3,024	3	77,90	2,39	(74,28. 81,51)
4,034	3	62,38	1,89	(58,77. 66,00)
4,951	3	67,46	2,46	(63,85. 71,07)

Desv.Est. agrupada = 2,80938

### **Comparación en parejas de Tukey**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

C_inicial [mg/L]	N	Media	Agrupación
1,006	3	82,22	A
1,954	3	81,42	A
3,024	3	77,90	A
4,951	3	67,46	B
4,034	3	62,38	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### **Efecto del pH**

#### **ANOVA**

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
pH	5	4,00. 5,00. 6,00. 7,00. 8,00

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	4	2413,39	603,348	94,17	0,000
Error	10	64,07	6,407		
Total	14	2477,47			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2,53123	97,41%	96,38%	94,18%

Medias

pH	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4,00	3	55,586	1,646	(52,330. 58,843)
5,00	3	67,99	3,44	( 64,73. 71,25)
6,00	3	68,01	2,21	( 64,75. 71,27)
7,00	3	43,67	2,23	( 40,42. 46,93)
8,00	3	36,57	2,77	( 33,31. 39,82)

Desv.Est. agrupada = 2,53123



### **Comparación en parejas de Tukey**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

pH	N	Media	Agrupación
6,00	3	68,01	A
5,00	3	67,99	A
4,00	3	55,586	B
7,00	3	43,67	C
8,00	3	36,57	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### **Efecto de la dosis de MO**

#### **ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales)**

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Dosis MO [g/L]	7	0,00. 0,25. 0,50. 0,75. 1,00. 1,50. 2,00

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Dosis MO [g/L]	6	18,8267	3,13779	241,34	0,000
Error	14	0,1820	0,01300		
Total	20	19,0087			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,114024	99,04%	98,63%	97,85%

Medias

Dosis MO [g/L]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0,00	3	-1,590	0,000	( -1,731. -1,449)
0,25	3	-0,6581	0,0893	(-0,7993. -0,5170)
0,50	3	-0,4303	0,0871	(-0,5715. -0,2891)
0,75	3	-0,0597	0,1168	(-0,2009. 0,0815)
1,00	3	0,3719	0,1007	( 0,2307. 0,5131)
1,50	3	0,8183	0,0775	( 0,6771. 0,9595)
2,00	3	1,522	0,214	( 1,381. 1,664)

Desv.Est. agrupada = 0,114024

### **Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson)**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Dosis MO [g/L]	N	Media	Agrupación
2,00	3	1,522	A
1,50	3	0,8183	B
1,00	3	0,3719	C
0,75	3	-0,0597	D
0,50	3	-0,4303	E
0,25	3	-0,6581	E
0,00	3	-1,590	F

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

## **Análisis estadístico para Pb**

### **Efecto del tiempo de contacto**

#### **ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales)**

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
t [min]	7	0. 10. 20. 30. 40. 50. 60

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
t [min]	6	14,562	2,42698	33,14	0,000
Error	14	1,025	0,07323		
Total	20	15,587			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,270611	93,42%	90,60%	85,20%

Medias

t [min]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	3	-1,440	0,000	( -1,775. -1,105)
10	3	-0,7208	0,0736	(-1,0559. -0,3857)
20	3	-0,4195	0,1048	(-0,7546. -0,0844)
30	3	-0,1052	0,1302	(-0,4403. 0,2298)
40	3	0,245	0,274	( -0,090. 0,580)
50	3	0,900	0,492	( 0,565. 1,235)

60            3        1,109            0,402    ( 0,774.    1,444)

Desv.Est. agrupada = 0,270611

### **Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson)**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

t [min]	N	Media	Agrupación
60	3	1,109	A
50	3	0,900	A B
40	3	0,245	B C
30	3	-0,1052	C D
20	3	-0,4195	C D
10	3	-0,7208	D E
0	3	-1,440	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### **Efecto de la concentración inicial de iones**

#### **ANOVA**

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia     $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
C0 [mg/L]	5	2,141. 3,973. 5,985. 8,057. 10,339

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
C0 [mg/L]	4	2734,25	683,562	98,22	0,000
Error	10	69,59	6,959		
Total	14	2803,84			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2,63803	97,52%	96,53%	94,42%

Medias

C0 [mg/L]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
2,141	3	77,15	2,18	(73,76. 80,54)
3,973	3	70,37	3,56	(66,97. 73,76)
5,985	3	62,18	2,36	(58,79. 65,58)
8,057	3	52,21	2,45	(48,81. 55,60)
10,339	3	38,92	2,41	(35,52. 42,31)

Desv.Est. agrupada = 2,63803

### **Comparación en parejas de Tukey**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

C0 [mg/L]	N	Media	Agrupación
2,141	3	77,15	A
3,973	3	70,37	A
5,985	3	62,18	B
8,057	3	52,21	C
10,339	3	38,92	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### **Efecto del pH**

#### **ANOVA**

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia     $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
pH	5	4,00. 5,00. 6,00. 7,00. 8,00

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	4	274,40	68,601	21,11	0,000
Error	10	32,50	3,250		
Total	14	306,91			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,80286	89,41%	85,17%	76,17%

Medias

pH	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4,00	3	81,283	1,656	(78,964. 83,602)
5,00	3	81,520	0,940	(79,201. 83,840)
6,00	3	93,11	2,37	( 90,79. 95,43)
7,00	3	85,18	1,92	( 82,86. 87,50)
8,00	3	84,96	1,82	( 82,64. 87,28)

Desv.Est. agrupada = 1,80286

## Comparación en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

pH	N	Media	Agrupación
6,00	3	93,11	A
7,00	3	85,18	B
8,00	3	84,96	B
5,00	3	81,520	B
4,00	3	81,283	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

## Efecto de la dosis de MO

### ANOVA (Post-transformación de Johnson para datos originales)

Método

Hipótesis nula                    Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                Por lo menos una media es diferente  
 Nivel de significancia         $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Dosis MO [g/L]	7	0,00. 0,25. 0,50. 0,75. 1,00. 1,50. 2,00

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Dosis MO [g/L]	6	14,9675	2,49458	45,62	0,000
Error	14	0,7655	0,05468		
Total	20	15,7330			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,233833	95,13%	93,05%	89,05%

Medias

Dosis MO [g/L]	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0,00	3	-1,541	0,000	( -1,830. -1,251)
0,25	3	-0,7415	0,0425	(-1,0310. -0,4519)
0,50	3	-0,259	0,241	( -0,549. 0,031)
0,75	3	0,005	0,334	( -0,284. 0,295)
1,00	3	0,392	0,398	( 0,102. 0,681)
1,50	3	0,860	0,221	( 0,571. 1,150)
2,00	3	1,0548	0,0639	( 0,7652. 1,3443)

Desv.Est. agrupada = 0,233833

***Comparación en parejas de Tukey (post-transformación de Johnson)***

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Dosis MO [g/L]	N	Media	Agrupación
2,00	3	1,0548	A
1,50	3	0,860	A B
1,00	3	0,392	B C
0,75	3	0,005	C
0,50	3	-0,259	C D
0,25	3	-0,7415	D
0,00	3	-1,541	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.