

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Evaluación del rango óptimo de tamaño de partícula de semilla triturada de *Moringa oleifera* Lam. durante procesos de coagulación-floculación**

**Proyecto de Investigación**

**Esteban Ricardo Núñez Enríquez**

**Ingeniería Química**

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

Quito, 22 de mayo de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO CIENCIAS E INGENIERIAS

HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Evaluación del rango óptimo de tamaño de partícula de semilla  
triturada de *Moringa oleifera* Lam. durante procesos de  
coagulación-floculación**

**Esteban Ricardo Núñez Enríquez**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Andrea Landázuri, Ph.D.  
Mario Caviedes, Ph.D.

Firma de los profesores

---

Quito, 22 de mayo 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: Esteban Ricardo Nuñez Enriquez

Código: 109752

Cédula de Identidad: 1717661860

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2017

## RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales consta de varios procesos sucesivos que mejoran la calidad de la misma; dos de ellos se conocen como clarificación y floculación-coagulación. En Ecuador, es común el uso de sulfato de aluminio como agente floculante, pero su impacto en el medio causa preocupación general debido a que este metal es reconocido por ser un agente potencialmente tóxico bajo ciertas condiciones de pH. Por este motivo, en la actualidad se investigan floculantes-coagulantes naturales que minimicen los daños y que a su vez cumplan con un rendimiento cercano o igual al obtenido con el químico mencionado. En este proyecto de investigación se evaluará el rango óptimo de semilla triturada de *Moringa oleifera* Lam. como agente floculante-coagulante para el tratamiento de efluentes del Distrito Metropolitano de Quito.

Palabras Clave: Demanda Química de Oxígeno, calidad de agua, tamaño de partícula, *Moringa oleifera*.

## ABSTRACT

Water treatment consists on various successive steps and two of these processes are known as clarification and flocculation-coagulation. In Ecuador, the use of aluminum sulfate is very common, but its impact within the environment is a cause of concern because of the potentially toxic effects under certain pH conditions. For this reason, natural flocculant-coagulant agents, like *Moringa oleifera* Lam. seeds, are being investigated. Previous studies have shown that *Moringa oleifera* these seeds are capable of minimizing damages in the environment when used for water treatment and allowing comparable yields of traditional chemical substances used in this process. In this research project, the optimum range size of crushed moringa seeds was evaluated during coagulation and flocculation processes. Natural coagulant-flocculant action was explored in three different water sources: Monjas River, San Pedro River and the effluent from the Pilot Water Resource Recovery Facility from the Water and Sanitation Company in Quito, Ecuador.

Key words: Chemical Oxygen Demand, water quality, particle size, *Moringa oleifera* Lam.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción .....	10
1.1	Puntos de muestreo.....	14
1.2	Descripción del estado de los cuerpos de agua .....	15
1.2.1	Río Monjas .....	15
1.2.2	Efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA) de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).....	17
1.2.3	Río San Pedro.....	17
2.	Metodología .....	18
2.1	Diseño Experimental.....	18
2.2	Procedimiento experimental.....	19
2.2.1	Recepción de muestras y prueba de jarras. ....	19
2.2.2	Preparación muestras de E. Coli .....	21
2.2.3	Preparación de muestras para medición de E. Coli, turbidez y DQO. ....	21
3.	Resultados y Discusiones .....	22
3.1	Estado inicial del agua y fechas de recolección .....	22
3.1.1	Río Monjas .....	22
3.1.2	Efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA) de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).....	22
3.1.3	Río San Pedro.....	23
3.1.4	Resumen del estado inicial de los puntos de muestreo .....	23
3.2	Curvas de calibración de la DQO.....	24
3.3	Resultados Río Monjas.....	24
3.3.1	DQO, Turbidez, pH.....	25
3.4	Resultados de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA) de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).....	32
3.5	Resultados Río San Pedro .....	38
4.	Conclusiones .....	46
5.	Referencias bibliográficas .....	48
6.	Anexos.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de contaminación de los principales ríos receptores de descargas de agua residual en el DMQ. ....	10
Tabla 2. Normas de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. Fuente: TULAS, Anexo I.....	11
Tabla 3. Aleatorización de tratamientos y unidades experimentales .....	20
Tabla 5. Descripción del estado inicial del agua recolectada en los diferentes puntos de muestreo y sus respectivas fechas y horas. ....	24
Tabla 6. Resultados globales obtenidos para las variables medidas y sus valores promedio, donde el valor promedio de (a) DQO está representado por <i>DQO</i> , b) turbidez por ( <i>Turb</i> ), y (c) E. Coli como ( <i>EC</i> ), finalizados los tres sets de muestreo y análisis. ....	26
Tabla 7. Medición de la variación de pH para cada muestra del río monjas tratada con los diferentes tamaños de partícula de <i>Moringa oleifera</i> . ....	29
Tabla 8. Análisis de varianza ANOVA, realizado para el primer set de muestreo, sobre las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) E. Coli. ....	30
Tabla 9. Resultados de la prueba de significación estadística de Tukey, para las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales E. Coli. Los tratamientos que han presentado similar remoción de contaminantes se han clasificado en el mismo rango, donde la clasificación A representa al mejor tratamiento. ....	31

Tabla 10. Resultados globales obtenidos para las variables medidas y sus valores promedio, donde el valor promedio de (a) DQO está representado por ( <i>DQO</i> ), b) turbidez por ( <i>Turb</i> ), y (c) E. Coli como ( <i>EC</i> ), finalizados los tres sets de muestreo y análisis. ....	32
Tabla 11. Variación de pH mediante la medición de este parámetro en las diferentes unidades experimentales una vez aplicados los diferentes tratamientos con <i>Moringa oleifera</i> . ....	35
Tabla 12. Análisis de varianza (ANOVA) realizado para los parámetros medidos (a) DQO (b) Turbidez y (c) E. Coli finalizados los tres sets de muestreo. ....	36
Tabla 13. Resultados de la prueba de significación estadística de Tukey, para las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales E. Coli. Los tratamientos que han presentado similar remoción de contaminantes se han clasificado en el mismo rango, donde la clasificación A representa al mejor tratamiento. ....	37
Tabla 14. Resultados globales obtenidos para las variables medidas y sus valores promedio, donde el valor promedio de (a) DQO está representado por ( <i>DQO</i> ), b) turbidez por ( <i>Turb</i> ), y (c) E. Coli como ( <i>EC</i> ), finalizados los tres sets de muestreo y análisis. ....	39
Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) realizado para los parámetros medidos (a) DQO (b) Turbidez y (c) E. Coli finalizados los tres sets de muestreo. ....	41
Tabla 16. Resultados de la prueba de significación estadística de Tukey, para las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales (E. Coli). Los tratamientos que han presentado similar remoción de contaminantes se han clasificado en el mismo rango, donde la clasificación A representa al mejor tratamiento. ....	42



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de los puntos de muestreo en los ríos: (a) Río Monjas, (b) Efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA)-EPMAPS, y (c) Río San Pedro; cuyas coordenadas de latitud y longitud son: (-0.085138, -78.487059); (-0.207693, -78.419231); y (-0.1940, -78.4759), respectivamente.....	16
Figura 2. Gráficas de los puntos sobre los que se realizó el muestreo, (a) Río Monjas (b) Efluente de la PPRA de la EPMAPS y (c) Río San Pedro. ....	23
Figura 3. Curvas de remoción de contaminantes en base a los parámetros de medición (a) DQO (b) Turbidez (c) E. Coli. ....	27
Figura 4. Variación de pH alcanzado con la evaluación de cada tratamiento realizado. ....	29
Figura 5. Remoción de contaminantes mediante la medición de las variables: (a) DQO, (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales (E. Coli).....	34
Figura 6. Curvas de control de pH para las mediciones realizadas al Efluente de la PPRA de la EPMAPS. ....	35
Figura 7. Representación de la remoción de contaminantes, medidos por los parámetros (a) DQO, (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales E. Coli.....	40
Figura 8. Análisis de varianza para el experimento factorial en el que se estudia la interacción entre los factores ríos y tamaño de partícula. ....	43
Figura 9. Gráfica de residuales realizado para determinan la calidad de ajuste de datos. ....	44
Figura 10. Interacción entre rango de tamaño de partícula y fuentes de agua. ....	45
Figura 11. Curvas de calibración realizadas para la medición de la variable DQO en las fechas (i) (ii) (iii) indicadas en la sección 4.1. ....	51

## 1. Introducción

Antiguamente los ríos y quebradas del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) eran conocidos por conformar inapreciables espacios biodiversos que, lastimosamente se han visto afectados por el crecimiento de la urbe y su consecuente demanda de servicios [1]. Según reportes nacionales del año 2016, los Ríos Monjas, Machángara, San Pedro y Guayllabamba, son los cuatro principales ríos que soportan la descarga de aguas residuales de la DMQ, de los cuales el 81% proviene de aguas servidas y el 19% por desechos industriales [2][3].

**Tabla 1.** Niveles de contaminación de los principales ríos receptores de descargas de agua residual en el DMQ.

<b>Cuerpo de agua Receptor</b>	<b>DQO [mg O<sub>2</sub>/L]</b>	<b>Nivel de Contaminación</b>
Río Machángara	> 500	Muy Contaminada
Río San Pedro	> 200	Contaminación Media
Río Monjas	> 634	Muy Contaminada
Río Guayllabamba	> 400	Altamente Contaminada

Ante esta realidad, la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) ha puesto en marcha el Programa para la Descontaminación de los Ríos de Quito (PDRQ). Este programa, además de ayudar a mejorar la calidad del agua de los ríos del DMQ, ha motivado y estimulado la investigación realizada en este proyecto.

Se considera que la calidad del agua es uno de los factores que determinan la salud y el estado de enfermedad de los seres vivos [4]. La calidad de la misma, en cualquier región, es determinada por procesos naturales como el desgaste, erosión del suelo, y por intrusiones antropogénicas, descargas de aguas residuales de origen municipal e industrial [5]. Por ello, se han determinado numerosos parámetros que permiten diagnosticar el estado de la misma.

En este proyecto se trabaja con cuatro de ellos: Demanda Química de Oxígeno (DQO), turbidez, presencia de coliformes fecales (*E. Coli*), y pH. El parámetro, DQO, es considerado como uno de los más trascendentales, ya que permite evaluar el efecto que produce el agua residual sobre el medio al cual es descargado [6]. Altos contenidos de DQO implican una mayor cantidad de material orgánico oxidable en la muestra, lo cual deriva en el decaimiento en los niveles de oxígeno disuelto [7]; y conduce hacia condiciones anaeróbicas, que perjudican a las formas de vida más complejas [8]. Los parámetros aceptados del texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente: norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua (TULAS) LIBRO VI, ANEXO I, muestra los límites aceptados que se detallan a continuación en la **Tabla 2.;****Error! La autoreferencia al marcador no es válida..**

Otro parámetro de interés en el tratamiento de aguas es la medición de turbidez, la cual puede tener dos constituyentes que se clasifican según su origen: orgánicos o inorgánicos. Los primeros han sido relacionados con efectos nocivos en comparación con los constituyentes inorgánicos; los cuales han demostrado albergar a microorganismos que posibilitan la reducción de luz a través del agua, reduciendo la actividad fotosintética, reprimiendo la presencia de oxígeno disuelto y disminuyendo las fuentes de alimentación para los seres acuáticos [7][9]. La presencia de coliformes fecales (*E. Coli*) según Edberg *et al.*, se considera como el principal indicador biológico en la caracterización de agua potable debido a que se encuentra presente en todas las heces de mamíferos; desde los años 1980 se consolida como el principal indicador biológico que confirma el adecuado tratamiento de aguas [10]. Finalmente, se ha elegido al pH como un parámetro de interés en este proyecto ya que, el valor de su medición da indicios de presencia microbiológica, ya que la mayoría de ellos prosperan en rangos de pH críticos, extremófilos [11].

**Tabla 2.** Normas de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. Fuente:

TULAS, Anexo I

<b>Norma</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Descarga a un cuerpo de agua dulce	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg O <sub>2</sub> /L	250
Límite de descarga al sistema de alcantarillado	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg O <sub>2</sub> /L	500
Criterios de calidad de aguas para fines recreativos mediante contacto secundario	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg O <sub>2</sub> /L	200
Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección	Turbiedad	-	NTU	10
	Coliformes Fecales	-	UFC	50
	Potencial de Hidrógeno	pH	-	[6-9]
Criterios de Calidad admisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuario.	Potencial de Hidrógeno	pH	-	[5-9]
	Coliformes Fecales	-	UFC	200
	Turbiedad	-	NTU	[0-10]
Criterios de calidad de aguas de uso agrícola o de riego y pecuario.	Coliformes Fecales	-	UFC	1000
	Potencial de Hidrógeno	pH	-	[6-9]

Uno de los procesos implicados en la potabilización y tratamiento de aguas residuales es la clarificación, el cual utiliza uno de los métodos más efectivos para la remoción de sólidos

suspendidos en el agua, la coagulación-floculación [12]. El fenómeno físico que ocurre en este proceso es la desestabilización de los coloides suspendidos, que generalmente es inducido por agentes químicos como: sales de aluminio, cloruro férrico, etc. [13]. Sin embargo, este proceso en general es pausado; razón por la cual se adicionan ciertos catalizadores como las poliacrilamidas, las cuales aceleran el proceso de coagulación por medio del incremento del tamaño del flóculo [14]. Actualmente, es común el uso de sulfato de aluminio y sulfato férrico como principales agentes coagulantes [15]; además, se conoce que los mismos poseen carga positiva a diferencia de las partículas coloidales que causan la turbidez en el agua, las cuales poseen carga negativa. Por ello, cuando los coágulos se adhieren y superan la gravedad específica del agua, forman flóculos, los cuales sedimentan y se neutralizan [16]. Sin embargo, estos coagulantes no siempre representan la opción más adecuada ya que investigaciones muestran que estos funcionan mejor en determinados rangos de pH y cuando se incrementa la concentración de metales en el agua, el proceso de floculación es deficiente [17].

Con el fin de superar este problema, se ha recurrido al estudio de coagulantes-floculantes naturales, como alternativa a los tratamientos químicos. Una de ellas se ha encontrado en las semillas del árbol de *Moringa oleifera* Lam. (llamado en adelante “*Moringa oleifera*”), conocido también el árbol milagroso, por sus múltiples aplicaciones entorno al campo: farmacéutico, cosmetológico, alimenticio y ambiental [18]. Probablemente, su uso más interesante sea en el campo ambiental, en el cual se han encontrado numerosas publicaciones en las que se prueba la utilización de la semilla como adsorbente natural y como agente de remoción de contaminantes debido a la presencia de gran cantidad de proteínas, las cuales actúan como polielectrolitos catiónicos al ser agregadas en agua cruda [8] [19]. El árbol de *Moringa oleifera* es originario del noreste de India y es posible encontrarlo creciendo en zonas cálidas sub-tropicales como las que poseen los países: Tailandia Malasia, Sri Lanka, y algunos países de América del sur como

Brasil, Ecuador y Costa Rica [20]. En Ecuador, las plantaciones de moringa se localizan en las provincias costeras de Manabí y Guayas, y en la última década su uso viene en aumento debido a su alto contenido de nutrientes y su amplio rango de uso en aplicaciones industriales, producción de alimentos, medicinas, condimentos y aceites [21][22].

En este trabajo de titulación se pretende explorar el grado de influencia del rango de tamaño de partícula de las semillas de moringa en el mejoramiento de la calidad del agua; así también se busca determinar el tamaño óptimo de tratamiento, sobre distintas fuentes de agua en la región interandina del Ecuador. Para corroborar los datos experimentales se recurrirá a realizar análisis de turbidez, pH, DQO y *E. Coli*.

Para la determinación del número de unidades experimentales y concentración de DQO se ha empleado la ecuación 1 y 2.

$$\text{unidades experimentales} = \text{tratamientos} \times \text{repeticiones} \quad [1]$$

$$C_{\text{DQO}} = L \times f \quad [2]$$

donde:

*tratamientos*: Número de los diferentes tamaños de partícula utilizados en el estudio.

*repeticiones*: Número de réplicas del tratamiento.

*L*: Lectura obtenida de la curva de calibración del equipo en [mg/L]

*f*: Factor de dilución.

### 1.1 Puntos de muestreo

El agua utilizada para desarrollo de este proyecto fue recolectada en los puntos ubicados sobre la Figura 1, siendo los puntos a, b y c las correspondientes zonas de muestreo en los Ríos Monjas,

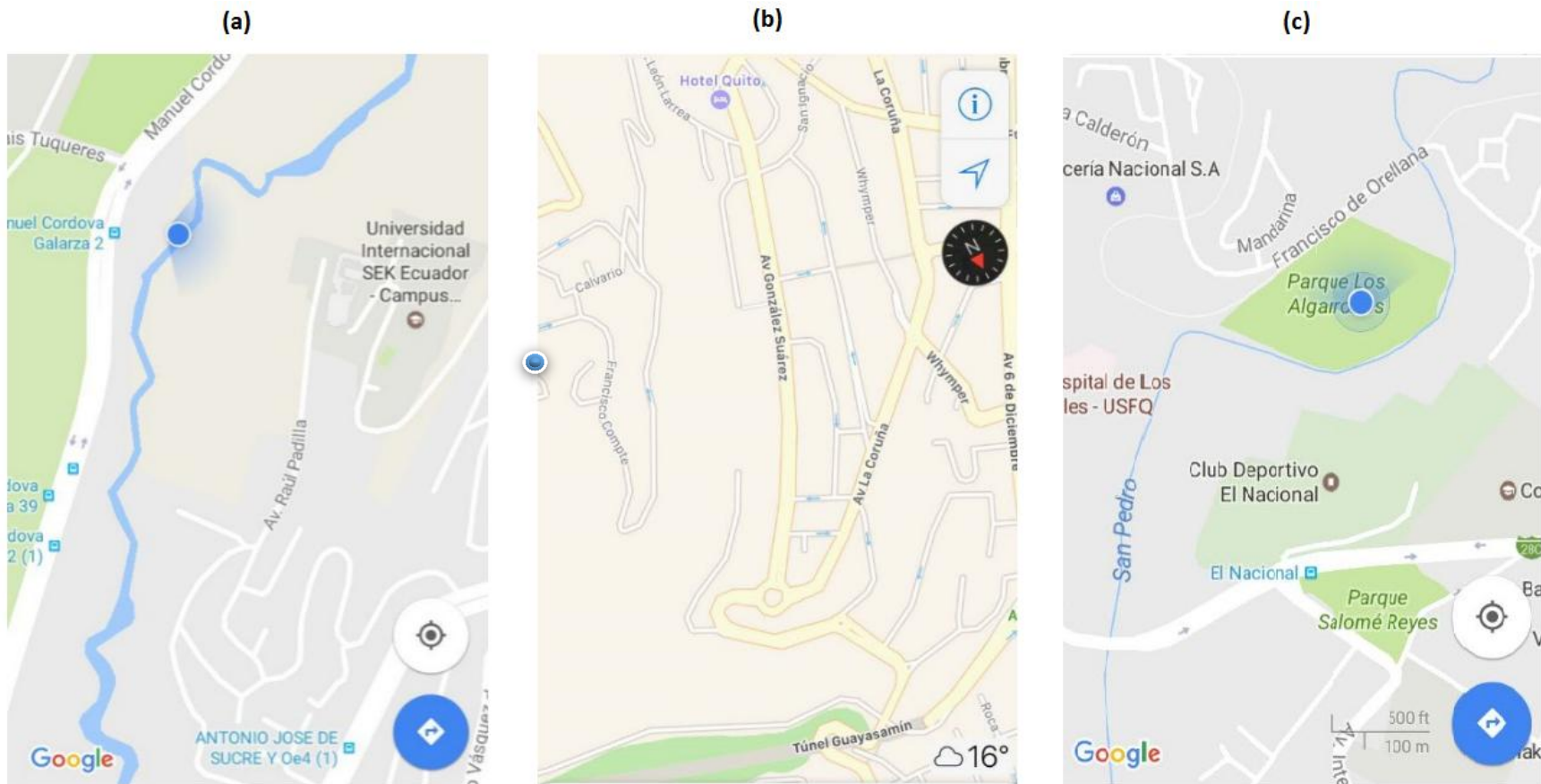
Efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA), de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), y San Pedro.

## **1.2 Descripción del estado de los cuerpos de agua**

La descripción del estado actual de los ríos analizados se detalla a continuación, tomando en cuenta el orden cronológico en el cual se realizó el muestreo. Cabe recalcar que el orden de muestreo se determinó en base a la necesidad de que el agua se mantenga lo más fresca posible, por ello se inició el muestreo en el punto más alejado, Río Monjas, luego se realizó el muestreo al efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA) de la EPMAPS y se finalizó con el Río San Pedro cuyo cauce atraviesa el valle de Cumbayá.

### **1.2.1 Río Monjas**

El primer punto de muestreo fue realizado en el Río Monjas; este recibe la descarga del 20% de las aguas servidas de Quito. Está ubicado al noroccidente de la ciudad sector que ha presenciado notables cambios debido al crecimiento urbano y poblacional, lo cual ha inferido en el estado actual del Río, convirtiéndolo en unos de los más contaminados del DMQ. El muestreo fue llevado a cabo los días sábado, 16 de noviembre y 15 de diciembre del 2016 y el día viernes 21 de enero del 2017, los tres sets de muestreo fueron realizados a las 06:30 am; a primera vista se pudo observar la presencia de espuma en la superficie del río y al realizar un acercamiento a la orilla del mismo se percibió fetidez. A su alrededor se encontraban pequeñas construcciones, en las cuales se establecían varias familias; muchos de sus árboles frutales como aguacate y limón se mostraban deteriorados por el ambiente presente en la zona.



**Figura 1.** Localización geográfica de los puntos de muestreo en los ríos: (a) Río Monjas, (b) Efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA)-EPMAPS, y (c) Río San Pedro; cuyas coordenadas de latitud y longitud son:  $(-0.085138, -78.487059)$ ;  $(-0.207693, -78.419231)$ ; y  $(-0.1940, -78.4759)$ , respectivamente.



### **1.2.2 Efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA) de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS)**

El segundo punto de muestreo fue realizado en la Planta Piloto de Recuperación de Agua de la Empresa Municipal de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) los mismos días indicados para el Río Monjas, pero con una hora de diferencia; es decir a las 7:30 am. Cabe recalcar que el agua de la PPRA fue previamente tratada por procedimientos químico-biológicos, de manera que no fue posible percibir fetidez u observar turbidez del agua.

### **1.2.3 Río San Pedro**

El tercer y último punto de muestreo fue realizado en el Río San Pedro a las 8:30 am. Este forma parte de los cuatro ríos principales que circulan por el DMQ, y se localiza en el sector de Tumbaco recibiendo todas las descargas provenientes de las zonas periféricas de la ciudad, lo cual en la actualidad lo convierte en río de contaminación media; a primera vista el Río San Pedro lucía turbio y era posible encontrar restos de plástico, basura, etc. en su orilla; a diferencia del Río Monjas, este es un río de contaminación media, fue notoria la ausencia de olores desagradables. El sector se encuentra poblado con árboles y plantas, no existen rastros de asentamiento humano en un perímetro de 2 kilómetros.

## 2. Metodología

### 2.1 Diseño Experimental

Resulta de gran importancia elaborar un diseño experimental eficaz, que permita llevar a cabo el procedimiento de la mejor forma, y que además permita optimizar el número de unidades representativas que permitan llegar a sólidas conclusiones. Este proyecto de titulación se ha fundamentado en el diseño completamente aleatorizado de un factor o también conocido como DCA. El mismo que se basa en un criterio de clasificación única, la cual consiste en que los experimentos sean aplicados completamente al azar en las unidades experimentales (Sanchez-Otero, 2017). Este hecho hace que el DCA exija unidades experimentales homogéneas y sea empleado sólo y exclusivamente cuando el material experimental utilizado y/o las condiciones del ambiente en las que se realiza la investigación sean homogéneas (Sánchez-Otero, 2017).

Una vez elegido el diseño a utilizar, el cual se basa en los tres principios del diseño de experimentos: repetición, aleatorización y control local; se ha establecido a “rango de tamaño de partícula de *Moringa oleifera* como factor en estudio, y las variables de respuesta al factor mencionado, son: DQO, turbidez, presencia de unidades formadoras de coliformes fecales y pH. Este experimento es considerado del tipo factorial, y se han propuesto cinco tratamientos, representados por los cinco diferentes tamaños de partícula de la semilla de *Moringa oleifera*; y tres niveles de tratamiento, representados por los Ríos Monjas, San Pedro y el efluente de la PPRA de la EPMAPS. En total se ha obtenido 45 unidades experimentales y 9 muestras de control. Finalmente, para estimar de manera correcta el efecto del tratamiento, los análisis de variables se han realizado por triplicado.

Con el fin de obtener la misma probabilidad de error aleatorio, se ha realizado la aleatorización de repeticiones mediante el software Minitab. En la Tabla 3 se muestra el orden de la aleatorización de tratamientos en sus respectivas unidades experimentales.

## **2.2 Procedimiento experimental**

Es importante mencionar que los análisis propuestos requirieron que las muestras de agua tomadas fueran lo más recientes posibles, varios autores concuerdan en que los tratamientos deberán llevarse a cabo en un lapso máximo de 4h a partir de la toma de muestras [23]. En las siguientes subsecciones se detallará cada paso del procedimiento experimental.

### **2.2.1 Recepción de muestras y prueba de jarras.**

Antes de adentrarnos en el protocolo realizado, es conveniente explicar lo que se desea lograr con la prueba de jarras. Las partículas a las que se llaman sólidos suspendidos, son pequeñas y finas partículas cargadas positivamente, las cuales deben ser removidas previo al tratamiento de aguas. Estas partículas no se asentarán por gravedad debido a que al estar cargadas positivamente se repelen. Se requiere de un agente químico que permita neutralizar las cargas y generar el proceso conocido como coagulación, para finalmente pasar el proceso de floculación en el que al estar en constante movimiento los flóculos se aglomerarán y finalmente podrán sedimentarse [24].

**Tabla 3.** Aleatorización de tratamientos y unidades experimentales

Orden de corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tratamientos	R1P4	R1P2	R1P5	R1P1	R1P3	R2P1	R2P3	R2P2	R2P5	R2P4	R3P3	R3P4	R3P1	R3P2	R3P5
	R1P4	R1P3	R1P5	R1P2	R1P1	R2P3	R2P2	R2P4	R2P5	R2P1	R3P3	R3P1	R3P5	R3P4	R3P2
	R1P3	R1P4	R1P5	R1P2	R1P1	R2P1	R2P4	R2P5	R2P3	R2P2	R3P1	R3P2	R3P4	R3P5	R3P3

\*El orden de corrida indica la secuencia con la que se tratarán las unidades experimentales.

**Notación:****Cuerpos de agua**

- R1: Río Monjas.
- R2: Efluente de la Planta Piloto de Recuperación (PPRA) de la EPMAPS.
- R3: Río San Pedro.

**Rangos de tamaño de partícula**

- P1: > 2000  $\mu\text{m}$
- P2: 1000 - 2000  $\mu\text{m}$
- P3: 710 - 1000  $\mu\text{m}$
- P4: 500 - 710  $\mu\text{m}$
- P5: 355 - 500  $\mu\text{m}$

Ahora, continuando con la metodología, las muestras que se detallan en la Tabla 4 fueron llevadas a laboratorio, donde se procedió a realizar la prueba de jarras, cuyo propósito es la simulación del proceso de mezclado y sedimentación llevado a cabo en las plantas de tratamiento industrial [12][15]. Dicha prueba fue llevada a cabo en vasos de 1000 mL, en los cuales fueron agregados 900 mL de las muestras de agua a tratar, y 100 mL de solución heterogénea de *Moringa Oleifera* con agua potable. Se configuró la prueba de jarras para un proceso secuencial, agitación a 100 rpm durante 1 minuto, y agitación a 20 rpm durante 25 minutos. Al finalizar la prueba de jarras se dejó reposar el agua durante dos horas; paralelamente se tomaron controles de pH, cada medición se realizó en lapsos de 30 minutos durante las 2 horas de sedimentación.

### **2.2.2 Preparación muestras de *E. Coli***

Con una jeringa de 100 cm<sup>3</sup> de capacidad, se tomaron alícuotas de 100 mL cada una y fueron ingresadas en frascos pequeños de 300 mL de capacidad, estos frascos fueron llevados a microbiología donde se han realizado el método de recuento de coliformes y *E. Coli*, el cual se basa en la extensión en placa Petri 100 µL de muestra en medio de cultivo Chromocult, específico

para este tipo de análisis. Después se extendió la muestra con un asa de vidrio, y se procedió a incubar a 35°C en la incubadora por 48 horas. La cuantificación fue realizada en unidades formadoras de colonia (UFC), donde el *E. Coli* se caracteriza por tener una coloración morada.

### **2.2.3 Preparación de muestras para medición de *E. Coli*, turbidez y DQO.**

Posteriormente, se tomaron alícuotas de 45 mL cada una, utilizando una jeringa de 100 cm<sup>3</sup>, y fueron ingresadas en tubos cónicos de centrífuga, donde posteriormente fueron centrifugadas a 3000 rpm durante 10 minutos. Inmediatamente, se tomaron 15 mL de la muestra centrifugada para colocarlos en tubos de ensayo, cubiertos con parafilm para su posterior

análisis de turbidez. Finalmente, se prepararon las muestras para el análisis de DQO, en tubos de ensayo donde se agregaron 2.5 mL de solución de digestión, 3.5 mL de solución de ácido sulfúrico y 2.5 mL del agua tratada. Se agitaron y enfriaron las muestras, posteriormente se realizó la digestión de las muestras a en el horno a 150°C durante dos horas; finalmente, se midieron los valores de absorción utilizando el espectrofotómetro.

### **3. Resultados y Discusiones**

#### **3.1 Estado inicial del agua y fechas de recolección**

##### **3.1.1 Río Monjas**

Como se ha mencionado con anterioridad, el primer punto de muestreo fue el Río Monjas; en el sector de Parcayacu, cerca del asentamiento de la Escuela Militar Eloy Alfaro, ESMIL. A primera vista se puede percibir la contaminación del río, el cual presenta un color característico oscuro, grisáceo; además, se percibió un olor nauseabundo y se pudo visualizar material orgánico en estado de putrefacción a sus orillas. Otra característica que llamó la atención, fue la presencia de espuma sobre sus aguas, la misma que puede ser un indicador de la presencia de moléculas tensoactivas de origen natural o sintético. Varios autores muestran que la espuma generada por tensoactivos naturales se acumulará a lo largo del cauce del río sobre bancos, troncos u otros materiales que se encuentren en la corriente; mientras que la espuma generada por tensoactivos sintéticos, productos de limpieza y cosméticos, se acumulan cerca de la fuente y no cubren grandes distancias, se disiparán en cuanto se elimine la fuente [25], como es el caso que se muestra en la Figura 2 (a).

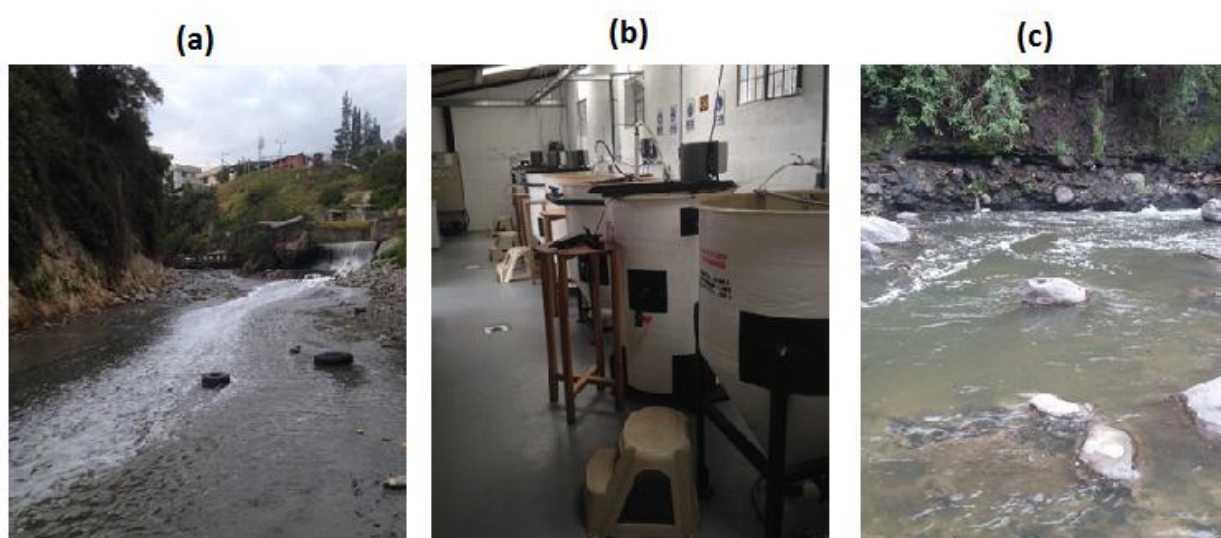
##### **3.1.2 Efluente de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA) de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS)**

El segundo punto de muestreo fue realizado en el efluente de la PPRA de la EPMAPS, localizado en el sector del batán; sus principales características se reducen a una baja turbidez

y una presencia limitada de malos olores. La Figura 2 (b) mostrada a continuación, describe las condiciones en las que se encontraba el efluente de la PPRA.

### 3.1.3 Río San Pedro

Finalmente, el tercer y último punto de muestreo fue el Río San Pedro, al cual se ha llegado por el sendero chaquiñán, ingresando por el puente que conecta el centro comercial Scala, con la ruta mencionada; el parque los algarrobos es el punto de ingreso al camino que lleva al mencionado río. A primera vista, la turbidez vuelve a ser notoria en sus aguas; a pesar de eso, la presencia de espuma y de olores nauseabundos es menor en comparación con el Río Monjas. También fue notoria la presencia de basura y restos de desechos plásticos. La Figura 2 (c) muestra el estado del agua al momento de realizar el muestreo.



**Figura 2.** Gráficas de los puntos sobre los que se realizó el muestreo, (a) Río Monjas (b) Efluente de la PPRA de la EPMAPS y (c) Río San Pedro.

### 3.1.4 Resumen del estado inicial de los puntos de muestreo

La

Tabla 4 muestra un resumen de la descripción general de los tres puntos de muestreo realizados en este proyecto; además apunta la hora en la que se han tomado las muestras, y las fechas en las que se han llevado a cabo los experimentos.

**Tabla 4.** Descripción del estado inicial del agua recolectada en los diferentes puntos de muestreo y sus respectivas fechas y horas.

			Descripción del estado del agua y hora de recolección de las muestras				
Día	Fecha	Hora	Río Monjas	Hora	EPMAPS	Hora	Río San Pedro
Sábado	11/11/2016	6h30	Olor nauseabundo, notoria turbidez, restos de desechos presentes a orillas del río.	7h30	Coloración ámbar, no existe presencia de sólidos suspendidos	8h30	Presencia de sólidos suspendidos, presencia de espuma y desechos en su orilla, olor nauseabundo.
Sábado	15/12/2016	7h30	Olor nauseabundo, espuma, notoria turbidez, restos de desechos, presentes a orillas del río.	7h30	Coloración ámbar, no existe presencia de sólidos suspendidos	8h30	Presencia de sólidos suspendidos, presencia de espuma y desechos en su orilla.
Viernes	21/01/2017	8h30	Olor nauseabundo, disminución de turbidez, baja presencia de espuma y desechos.	7h30	Coloración ámbar, no existe presencia de sólidos suspendidos	8h30	Alta turbidez, presencia de desechos en su orilla.

### 3.2 Curvas de calibración de la DQO

Para cada fecha en la que los análisis han sido realizados se han elaborado curvas de calibración, las mismas que podrán verse en la sección anexos, con el fin de determinar el valor de absorbancia y el posterior cálculo de la DQO para cada tratamiento, Figura 11.

### 3.3 Resultados Río Monjas

Las variables medidas al terminar la prueba de jarras fueron DQO, turbidez, presencia de coliformes fecales, y también se llevó a cabo un control de pH a cada unidad experimental en intervalos de 30 minutos, durante dos horas.



### 3.3.1 DQO, Turbidez, pH

Este parámetro es un indicador de la cantidad materia orgánica existente en el sistema acuático en estudio; y cuando los valores de este indicador son altos, como se indica en **Tabla 5** se corre el riesgo de un potencial agotamiento del oxígeno disuelto, precursor de la vida acuática, en el sistema [7]; otro parámetro de gran importancia para este estudio es la turbidez. Durante varios años se ha tomado el valor de esta variable como medida de la calidad del agua, ya que es un indicador del incremento de actividad biológica, y proporciona una matriz para transportar microorganismos o introducirlos al sistema, lo cual causa la degradación de la calidad del agua [23]; las unidades en las que se ha medido este parámetro son NTU. Otro de los parámetros que se ha medido es la presencia de coliformes fecales, *Escherichia coli*; variable que a partir de los años 1890, con la llegada de la tecnología de sustrato definido, fue considerada como principal indicador biológico en la seguridad del tratamiento de agua [10]. Las unidades en las que se ha medido este parámetro son los (UFC) o unidades formadoras de colonia. La Tabla 5

**Tabla 5.** Resultados globales obtenidos para las variables medidas y sus valores promedio, donde el valor promedio de (a) DQO está representado por  $DQO$ , b) turbidez por ( $Turb$ ), y (c) *E. Coli* como ( $EC$ ), finalizados los tres sets de muestreo y análisis.

(a) Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	$DQO_1$ [mg/L]	$DQO_2$ [mg/L]	$DQO_3$ [mg/L]
R1P1	> 2000	521.73 +- 4.26	506.41 +- 1.54	413.40 +- 24.64
R1P2	1000 – 2000	371.07 +- 6.43	236.97 +- 10.00	141.40 +- 12.17
R1P3	710 – 1000	441.73 +- 23.09	262.63 +- 1.73	143.40 +- 13.40
R1P4	500 – 710	478.40 +- 8.00	270.30 +- 6.91	240.07 +- 11.94
R1P5	355 – 500	506.67 +- 2.00	500.30 +- 5.77	360.07 +- 11.55
R10	0.00	535.07 +- 15.53	512.52 +- 6.94	544.73 +- 30.17

(b) Turbidez

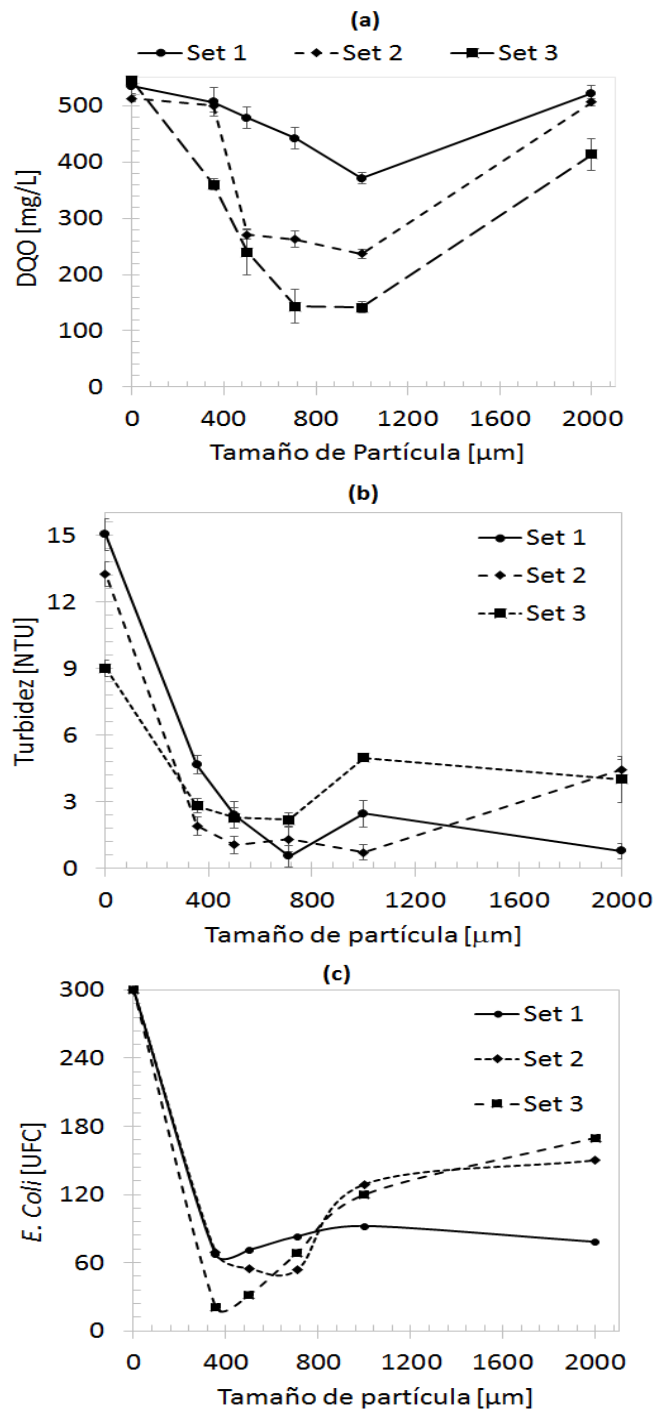
Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	$Turb_1$ [NTU]	$Turb_2$ [NTU]	$Turb_3$ [NTU]
R1P1	> 2000	0.77 +- 0.36	4.44 +- 1.03	4.01 +- 0.47
R1P2	1000 – 2000	2.46 +- 0.62	0.72 +- 0.16	4.98 +- 0.34
R1P3	710 – 1000	0.54 +- 0.49	1.31 +- 0.29	2.19 +- 0.56
R1P4	500 – 710	2.40 +- 0.62	1.05 +- 0.47	2.27 +- 0.40
R1P5	355 – 500	4.65 +- 0.42	1.91 +- 0.33	2.81 +- 0.41
R10	0.00	15.03 +- 0.70	13.25 +- 0.37	9.01 +- 0.54

(c) Coliformes fecales,

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	$EC_1$ [UFC]	$EC_2$ [UFC]	$EC_3$ [UFC]
R1P1	> 2000	78.00	150.00	170.00
R1P2	1000 – 2000	92.00	129.00	120.00
R1P3	710 – 1000	83.00	54.00	69.00
R1P4	500 – 710	71.00	55.00	32.00
R1P5	355 – 500	67.00	69.00	21.00
R10	0.00	300.00	300.00	300.00

\* $DQO_i$ : Valor i-ésimo promedio de DQO medido en [mg  $O_2$ /L];  $Turbidez_i$ : Valor i-ésimo promedio de turbidez medido en [NTU] (Unidad Nefelométrica de Turbidez);  $E. Coli_i$ : Valor i-ésimo promedio de presencia de coliformes fecales (*E. Coli*) medido en [UFC] (Unidades Formadoras de Colonia). Donde  $i$  representa la fecha de recolección de la muestra.

La Figura 3 muestra una representación gráfica de la remoción de materia orgánica: (a) DQO, (b) turbidez y presencia de coliformes fecales: (c) *E. Coli*.



**Figura 3.** Curvas de remoción de contaminantes en base a los parámetros de medición (a)

DQO (b) Turbidez (c) *E. Coli*.

En cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Tabla 5 (a) muestra que en todas las unidades experimentales se alcanza cierto grado de remoción de materia orgánica. Los tratamientos en los que han utilizado los tamaños de partícula  $P_1$  y  $P_5$  correspondientes a 2000

$\mu m$  y 355  $\mu m$  respectivamente, fueron los menos eficaces en comparación con los tratamientos P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, y P<sub>4</sub>. Se notó que el tratamiento realizado con P<sub>2</sub> (1000  $\mu m$ ), alcanzó el valor más alto de remoción promedio:  $(249.8 \pm 12.17)$  [mg O<sub>2</sub>/L], lo cual corresponde a una remoción del 53% de la DQO inicial. Es importante mencionar que según la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes el límite de descarga de la DQO en cuerpos de agua dulce es de 240 [mgO<sub>2</sub>/L] [26]. Los resultados obtenidos para el set 2 y 3 de DQO cumplen con este requerimiento ambiental, mientras que la DQO del primer set de muestreo se encuentra fuera del rango aceptado.

En cuanto al parámetro turbidez, la Tabla 5 (b) muestra que los tratamientos aplicados logran disminuir el valor de esta variable en cada unidad experimental. Se ha visto que el mejor de los tratamientos ha alcanzado una remoción del 96% cuando se ha empleado el rango de tamaño de partícula P<sub>3</sub> (710  $\mu m$ ); de igual forma se ha observado que en los tamaños de partícula P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, y P<sub>4</sub>, los cuales se encuentran en el rango  $(500 \leq x \leq 1000)$   $\mu m$ , la remoción de turbidez vuelve a superar a los tratamientos realizados con los tamaños P<sub>1</sub> y P<sub>5</sub>, (2000 y 355)  $\mu m$  respectivamente.

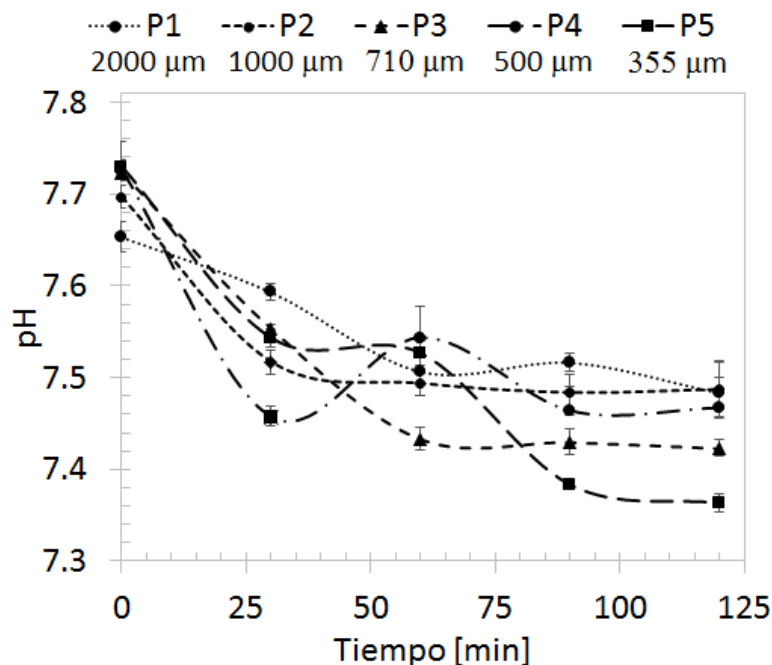
En cuanto a la presencia de coliformes fecales, los resultados mostrados en la Tabla 5 (c) muestra el efecto que han tenido los tratamientos al reducir notablemente las colonias de *E. Coli*. Inicialmente se ha tabulado un número incontable de unidades formadoras de colonia, según el departamento de microbiología de la USFQ se considera así a partir de los 350 [UFC], valor que se ha reducido hasta 52.33 [UFC]. El porcentaje de remoción alcanzado en el mejor de los tratamientos es del 83%. Según la norma de la calidad ambiental y descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce, el límite permitido de *E. Coli* es de 1000 [UFC] para uso agropecuario, y 200 [UFC] como límite para consumo humano y doméstico, donde para su potabilización solo se requiere desinfección [26].

Con respecto al control de pH realizado, cabe mencionar que se ha realizado una vez finalizada la prueba de jarras, durante intervalos de 30 minutos, por dos horas. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Medición de la variación de pH para cada muestra del río monjas tratada con los diferentes tamaños de partícula de Moringa oleifera .

Tiempo [min]	Tratamientos					
	R10	R1	R2	R3	R4	R5
0.00	7.80	7.65	7.70	7.72	7.73	7.73
30.00	7.80	7.59	7.52	7.55	7.46	7.54
60.00	7.80	7.51	7.49	7.43	7.54	7.53
90.00	7.80	7.52	7.48	7.43	7.46	7.38
120.00	7.80	7.48	7.49	7.42	7.47	7.36

Para poder tener una mejor visualización del efecto de la semilla sobre el pH de la muestra, se grafica en la Figura 4 la variación de pH en el tiempo.



**Figura 4.** Variación de pH alcanzado con la evaluación de cada tratamiento realizado.

Para encontrar el mejor tratamiento aplicado se realiza el análisis estadístico ANOVA, del cual, y en base a los resultados obtenidos de esta prueba, se ha decidido si realizar o no una

prueba complementaria de significación estadística, conocida como prueba de Tukey; este análisis de significación se lo realizó únicamente cuando esta condición del ANOVA se cumplía:

$$F_C > F_T \quad [3]$$

donde:

$F_C$ : Coeficiente de Fischer calculado.

$F_T$ : Coeficiente de Fischer tabulado.

**Tabla 7.** Análisis de varianza ANOVA, realizado para el primer set de muestreo, sobre las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) *E. Coli*.

<b>(a) Demanda Química de Oxígeno</b>					
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17	327975.88	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5	201429.26	40285.85	3.82	3.11
<b>Error</b>	12	126546.63	10545.55	-	-

<b>(b) Turbidez</b>					
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17	299.89	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5	257.14	51.43	14.44	3.11
<b>Error</b>	12	42.75	3.56	-	-

<b>(c) Presencia de Coliformes Fecales (<i>E. Coli</i>)</b>					
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17	141136.00	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5	133044.67	26608.93	39.46	3.11
<b>Error</b>	12	8091.33	674.28	-	-

FV: Fuentes de variación; GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrado medio;  $F_C$ : Valor de la prueba de Fischer calculada;  $F_T$ : Valor de la prueba de Fischer tabulada.

El análisis ANOVA de la Tabla 7 muestra que las tres variables cumplen con la desigualdad (3). Esto indica que estadísticamente los valores medios de los tratamientos aplicados no son iguales. La comprobación de esta hipótesis permite que se realice una prueba de significación estadística complementaria, Tukey, la cual permitirá encontrar el mejor tratamiento.

**Tabla 8.** Resultados de la prueba de significación estadística de Tukey, para las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales *E. Coli*. Los tratamientos que han presentado similar remoción de contaminantes se han clasificado en el mismo rango, donde la clasificación A representa al mejor tratamiento.

**(a) Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Tratamiento	P2	P3	P4	P5	P1	P0
Valor medio	249.81	282.59	329.59	455.68	480.51	530.77
Rango	A	B	B	B	B	B

**(b) Turbidez**

Tratamiento	P3	P4	P2	P1	P5	P0
Valor medio	1.35	1.91	2.72	3.07	3.13	12.43
Rango	A	A	A	A	A	B

**(c) Presencia de coliformes fecales (*E. Coli*)**

Tratamiento	P3	P4	P2	P1	P5	P0
Valor medio	52.33	52.67	68.67	113.67	132.67	300.00
Rango	A	A	A	B	B	C

Los resultados de la Tabla 8 (a) muestran que estadísticamente los tratamientos P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub> y P<sub>1</sub> generan similar remoción de contaminante. Lo contrario sucede con el tratamiento P<sub>2</sub> el cual se clasifica en un rango diferente, la DQO ha sido significativamente reducida con este tratamiento. A su vez, al observar la **Tabla 8** (b), se determina que los cinco tratamientos aplicados han logrado remover turbidez del agua de manera eficaz, ya que los cinco tratamientos se encuentran clasificados dentro del mismo rango y muestran una diferencia marcada con respecto a la muestra de control. En cuanto a la **Tabla 8** (c), se puede observar que los tratamientos P<sub>1</sub> y P<sub>5</sub> fueron los menos efectivos, estos tratamientos llevaban los tamaños de partícula 2000  $\mu\text{m}$  y 355  $\mu\text{m}$  respectivamente. A su vez, los tratamientos P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, y P<sub>4</sub> se encuentran clasificados en un mismo rango, gracias a la efectividad que presentan en cuanto a la remoción de colonias formadoras de coliformes fecales.

### 3.4 Resultados de la Planta Piloto de Recuperación de Agua (PPRA) de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).

Al igual que los análisis realizados para el Río Monjas, en la Tabla 9. se resumen los valores globales encontrados para las variables: DQO, turbidez y *E. Coli* utilizando como fuente de agua al efluente de la PPRA de la EPMAPS.

**Tabla 9.** Resultados globales obtenidos para las variables medidas y sus valores promedio, donde el valor promedio de (a) DQO está representado por  $DQO_i$ , b) turbidez por ( $Turb_i$ ), y (c) *E. Coli* como ( $EC_i$ ), finalizados los tres sets de muestreo y análisis.

(a) Demanda Química de Oxígeno

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	$DQO_1$ [mg/L]	$DQO_2$ [mg/L]	$DQO_3$ [mg/L]
R2P1	> 2000	249.73 +- 4.16	186.41 +- 0.84	202.73 +- 12.86
R2P2	1000 – 2000	170.40 +- 4.00	150.08 +- 0.69	99.40 +- 4.00
R2P3	710 – 1000	216.40 +- 9.17	156.97 +- 13.33	122.07 +- 5.77
R2P4	500 – 710	329.07 +- 4.62	202.63 +- 3.48	228.07 +- 13.46
R2P5	355 – 500	435.07 +- 4.08	229.41 +- 1.35	276.73 +- 2.31
R20	0.00	361.73 +- 13.01	229.52 +- 8.47	307.40 +- 4.00

(b) Turbidez

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	$Turb_1$ [NTU]	$Turb_2$ [NTU]	$Turb_3$ [NTU]
R2P1	> 2000	3.12 +- 0.11	2.52 +- 0.10	5.25 +- 0.24
R2P2	1000 – 2000	2.46 +- 0.08	2.88 +- 0.09	3.14 +- 0.04
R2P3	710 – 1000	1.71 +- 0.07	3.59 +- 0.03	2.92 +- 0.03
R2P4	500 – 710	2.67 +- 0.14	4.21 +- 0.11	4.79 +- 0.13
R2P5	355 – 500	2.85 +- 0.78	2.76 +- 0.35	4.95 +- 0.14
R20	0.00	5.87 +- 0.08	4.29 +- 0.02	7.10 +- 0.07

(c) Presencia de coliformes fecales, *E. Coli*

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	$E. Coli_1$ [UFC]	$E. Coli_2$ [UFC]	$E. Coli_3$ [UFC]
R2P1	> 2000	25.00	32.00	300.00
R2P2	1000 – 2000	32.00	29.00	110.00
R2P3	710 – 1000	33.00	28.00	105.00
R2P4	500 – 710	12.00	20.00	70.00
R2P5	355 – 500	4.00	14.00	53.00
R20	0.00	82.00	101.00	300.00

$DQO_i$ : Valor i-ésimo promedio de DQO medido en [mg  $O_2$ /L];  $Turbidez_i$ : Valor i-ésimo promedio de turbidez medido en [NTU] (Unidad Nefelométrica de Turbidez);  $E. Coli_i$ : Valor i-ésimo promedio de presencia de coliformes fecales (*E. Coli*), medido en [UFC] (Unidades Formadoras de Colonia).

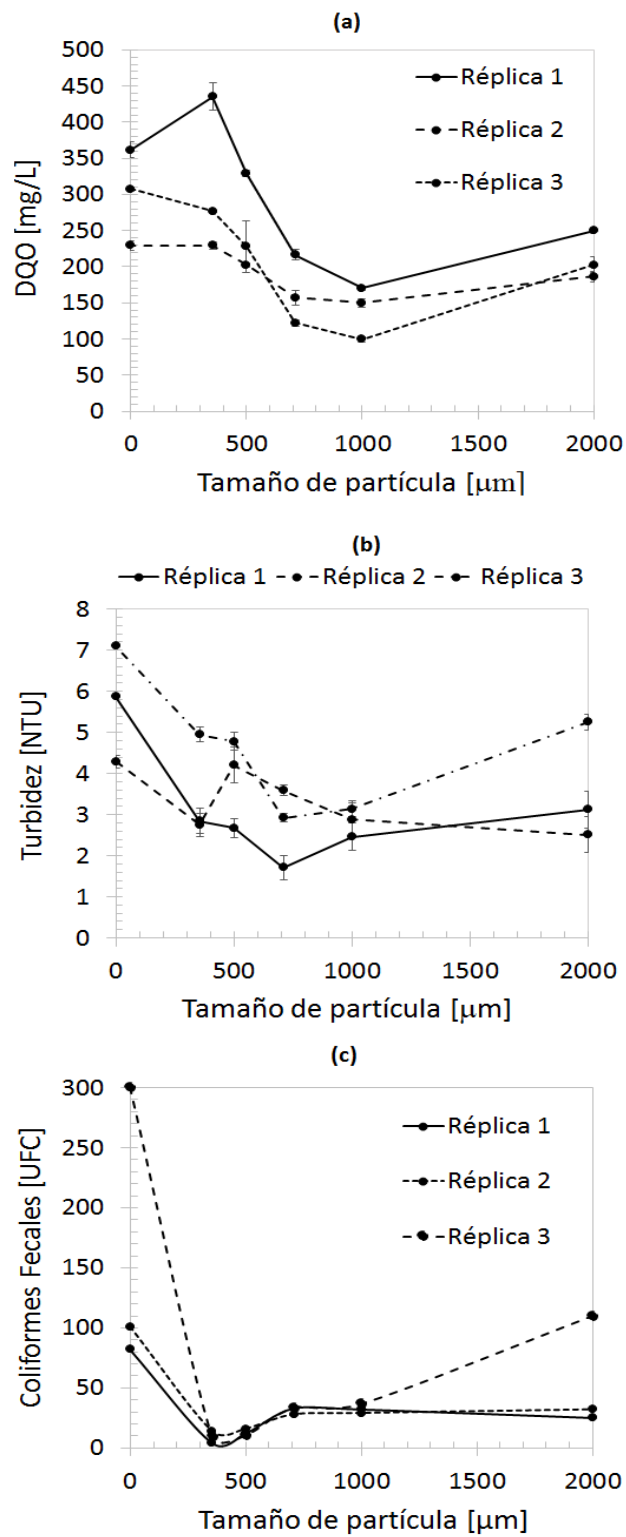


La Tabla 9 (a) muestra la disminución de materia orgánica, medida por el parámetro DQO. Al igual que en el Río Monjas, todos los tratamientos aplicados han reducido la concentración de materia orgánica en el agua, con excepción del tratamiento llevado a cabo con el rango de tamaño de partícula P<sub>5</sub> 355  $\mu\text{m}$ . También se puede apreciar que dos de los tratamientos aplicados han logrado mejorar el límite aceptable para la descarga de efluentes en agua dulce de 240 [mg O<sub>2</sub>/ L], dictado por la normativa de calidad del agua [26], estos tratamientos se efectuaron con los tamaños de partícula P<sub>2</sub> y P<sub>3</sub>. El mejor de los tratamientos promedio alcanza el 54% de remoción de la DQO.

En cuanto al parámetro turbidez, la Tabla 9 (b) muestra que todos los tratamientos aplicados han reducido la cantidad de sólidos disueltos en el agua, 71% de remoción en el mejor de los tratamientos. Finalmente, cabe recalcar que el efecto bactericida de las semillas de *Moringa oleifera* se muestra en la Figura 4 (c), en donde el mejor de los tratamientos logra que la presencia de coliformes fecales (*E. Coli*) se reduzca en un 95%, este efecto se ha logrado al aplicar el tratamiento con rango de tamaño de partícula P<sub>5</sub> (355  $\mu\text{m}$ ). Se puede observar que el efecto bactericida mejora a medida que incrementa la superficie de contacto, y esto ocurre con los tamaños de partícula más pequeños; muestra de ello es la alta presencia de colonias de *E. Coli* con los tratamientos P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>, 2000  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$  respectivamente.

En cuanto al control de pH, la Tabla 10 muestra el efecto que tienen los tratamientos sobre las unidades experimentales, el efecto que tienen los tratamientos es un efecto tapón o buffer.

Para visualizar de mejor manera los resultados globales presentados en la Tabla 10, se grafican las curvas de remoción de contaminantes en Figura 5.



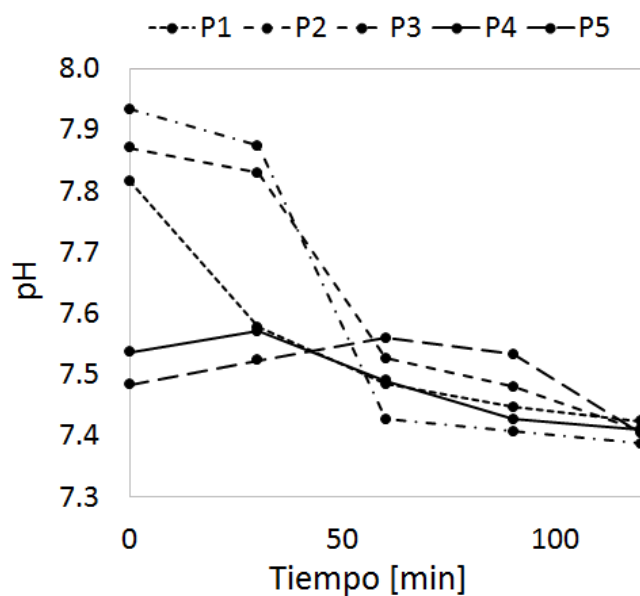
**Figura 5.** Remoción de contaminantes mediante la medición de las variables: (a) DQO, (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales (E. Coli).

**Tabla 10.** Variación de pH mediante la medición de este parámetro en las diferentes unidades experimentales una vez aplicados los diferentes tratamientos con *Moringa oleifera* .

Tiempo [min]	Tratamientos						pH
	Muestra Blanco	P1	P2	P3	P4	P5	
0.00	8.69	7.82	7.87	7.93	7.54	7.48	
30.00	8.69	7.58	7.83	7.87	7.57	7.52	
60.00	8.69	7.48	7.53	7.43	7.49	7.56	
90.00	8.69	7.45	7.48	7.41	7.43	7.53	
120.00	8.69	7.42	7.41	7.39	7.41	7.40	

$P_i$ : Rango de tamaño de partícula i-ésimo utilizado en las diferentes unidades experimentales.

Con el fin de visualizar de la mejor manera posible los datos presentados en la Tabla 10, se realizan las curvas de control de pH y se discute su efecto.



**Figura 6.** Curvas de control de pH para las mediciones realizadas al Efluente de la PPRA de la EPMAPS.

Con el fin de determinar el mejor tratamiento aplicado a las distintas unidades experimentales, se ha realizado el análisis estadístico de varianza (ANOVA) para los datos mostrados en la Tabla 5. En caso de que la desigualdad [3] se cumpliera se realiza un análisis de significancia

estadística adicional, conocido como prueba de Tukey. El análisis ANOVA se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 11.** Análisis de varianza (ANOVA) realizado para los parámetros medidos (a) DQO (b) Turbidez y (c) E. Coli finalizados los tres sets de muestreo.

**(a) Demanda Química de Oxígeno**

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17.00	125334.99	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5.00	74971.80	14994.36	3.57	3.11
<b>Error</b>	12.00	50363.19	4196.93	-	-

**(b) Turbidez**

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17.00	39.52	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5.00	27.09	5.42	5.23	3.11
<b>Error</b>	12.00	12.43	1.04	-	-

**(c) Presencia de Coliformes Fecales, *E. Coli***

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17.00	81764.44	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5.00	48031.78	9606.36	3.42	3.11
<b>Error</b>	12.00	33732.67	2811.06	-	-

FV: Fuentes de variación; GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; FC: Número de Fischer calculado; FT: Número de Fischer tabulado.

La Tabla 11 muestra que los parámetros estudiados: (a) DQO, (b) turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales, *E. Coli*, cumplen con la desigualdad [3], esto implica que al menos uno de los tratamientos aplicados difiere del otro. Adicionalmente se ha realizado la prueba de significación estadística, que permite encontrar el mejor tratamiento aplicado a las aguas del efluente de la planta piloto. La tabla que se muestra a continuación resume los resultados de la prueba de Tukey.

**Tabla 12.** Resultados de la prueba de significación estadística de Tukey, para las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales *E. Coli*. Los tratamientos que han presentado similar remoción de contaminantes se han clasificado en el mismo rango, donde la clasificación A representa al mejor tratamiento.

**(a) Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Tratamiento	P2	P3	P1	P4	P5	P0
Valor medio	139.96	165.14	212.96	253.26	299.55	313.74
Rango	B	B	B	B	A	A

**(b) Turbidez**

Tratamiento	P3	P2	P5	P1	P4	P0
Valor medio	2.74	2.83	3.52	3.63	3.89	5.75
Rango	C	B	B	B	B	A

**(c) Presencia de coliformes fecales (*E. Coli*)**

Tratamiento	P5	P4	P3	P2	P1	P0
Valor medio	23.67	34	55.33	57	119	161
Rango	C	B	B	B	A	A

$P_i$ : Tratamiento *i*-ésimo empleando los distintos tamaños de partícula de la semilla *Moringa oleifera* Lam.  $P_0$ : Muestra testigo.

La Tabla 12 (a) muestra que, para la DQO, el tratamiento P5 355  $\mu\text{m}$  fue ineficiente por sus valores estadísticamente iguales a los de la muestra control P0. Con respecto a los demás tratamientos, estos se encuentran clasificados en un mismo rango; esta clasificación indica que se obtuvieron mayores remociones de la DQO utilizando tamaños de partícula en un rango entre los ( $500 \leq x \leq 2000$ )  $\mu\text{m}$ . En cuanto al parámetro turbidez, la Tabla 12 (b) muestra que los tratamientos han sido efectivos en cuanto a remoción de sólidos suspendidos, ya que la muestra testigo se encuentra clasificada en un rango diferente a todos los tratamientos; esto implica que existe una diferencia significativa entre los valores medidos con el agua tratada y con el agua sin tratar; sin embargo, es posible determinar que el rango de tamaño de partícula  $P_3$  (710  $\mu\text{m}$ ) ha sido el que mayor cantidad de sólidos disueltos ha logrado flocular – coagular, reduciendo a más de la mitad de los sólidos que existían en un inicio, 52%. Finalmente, los resultados de la Tabla 12 (c) muestran que para la remoción de

unidades formadoras de *E. Coli*, el tratamiento de menor eficacia es el de mayor rango de tamaño de partícula  $P_1$  2000  $\mu\text{m}$ . Mientras que, los tratamientos  $P_4$ ,  $P_2$ , y  $P_3$  se clasifican en otro rango que favorece a la remoción de colonias de *E. Coli*; pero es precisamente el tratamiento  $P_5$  ( $355 \leq x \leq 500$ )  $\mu\text{m}$  el que mejor resultados ofrece en cuanto a la disminución de coliformes fecales, 85%.

### **3.5 Resultados Río San Pedro**

Al igual que las muestras de agua anteriores: Río Monjas y Efluente de la PPRA de la EPMAAPS, los parámetros analizados: DQO, turbidez, y presencia de coliformes fecales (*E. Coli*), se resumen a continuación. También se han realizado mediciones de control de pH y los respectivos análisis de varianza (ANOVA). Adicionalmente, para optimizar el proceso de floculación-coagulación y remoción de contaminantes, se han realizado pruebas complementarias de significación estadística, Tukey.

**Tabla 13.** Resultados globales obtenidos para las variables medidas y sus valores promedio, donde el valor promedio de (a) DQO está representado por (*DQO*), b) turbidez por (*Turb*), y (c) *E. Coli* como (*EC*), finalizados los tres sets de muestreo y análisis.

**(a) Demanda Química de Oxígeno**

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	<i>DQO</i> <sub>1</sub> [mg/L]	<i>DQO</i> <sub>2</sub> [mg/L]	<i>DQO</i> <sub>3</sub> [mg/L]
R3P1	> 2000	461.73 +- 3.06	422.08 +- 10.54	336.67 +- 4.73
R3P2	1000 – 2000	329.07 +- 8.08	207.99 +- 19.52	159.40 +- 10.58
R3P3	710 – 1000	372.40 +- 6.00	333.68 +- 3.82	215.40 +- 23.07
R3P4	500 – 710	405.73 +- 4.16	359.26 +- 6.09	334.80 +- 9.37
R3P5	355 – 500	459.73 +- 6.11	402.19 +- 2.67	400.73 +- 30.35
R30	0.00	499.07 +- 4.62	445.97 +- 12.00	474.73 +- 19.43

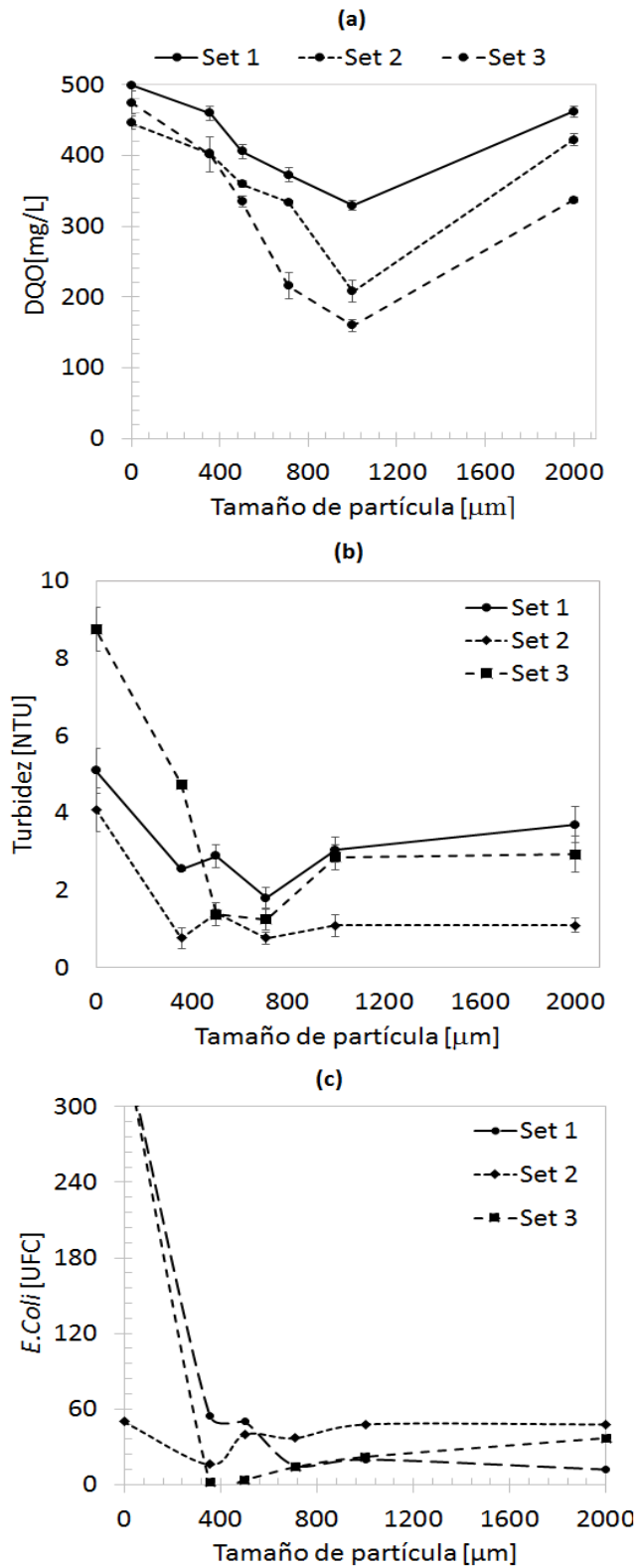
**(b) Turbidez**

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	<i>Turbidez</i> <sub>1</sub> [NTU]	<i>Turbidez</i> <sub>2</sub> [NTU]	<i>Turbidez</i> <sub>3</sub> [NTU]
R3P1	> 2000	0.77 +- 0.25	4.44 +- 0.02	4.01 +- 0.03
R3P2	1000 – 2000	2.46 +- 0.08	0.72 +- 0.01	4.98 +- 0.05
R3P3	710 – 1000	0.54 +- 0.07	1.31 +- 0.03	2.19 +- 0.01
R3P4	500 – 710	2.40 +- 0.12	1.05 +- 0.01	2.27 +- 0.03
R3P5	355 – 500	4.65 +- 0.01	1.91 +- 0.07	2.81 +- 0.17
R30	0.00	15.03 +- 0.12	13.25 +- 0.14	9.01 +- 0.38

**(c) Presencia de coliformes fecales, *E. Coli***

Muestra	Rango de tamaño de partícula[ $\mu\text{m}$ ]	<i>E. Coli</i> <sub>1</sub> [UFC]	<i>E. Coli</i> <sub>2</sub> [UFC]	<i>E. Coli</i> <sub>3</sub> [UFC]
R30	> 2000	350.00	50.00	350.00
R3P1	1000 – 2000	55.00	16.00	2.00
R3P2	710 – 1000	50.00	40.00	4.00
R3P3	500 – 710	15.00	37.00	14.00
R3P4	355 – 500	20.00	48.00	22.00
R3P5	0.00	12.00	48.00	37.00

*DQO*<sub>i</sub>: Valor i-ésimo promedio de DQO medido en [mgO<sub>2</sub>/L]; *Turbidez*<sub>i</sub>: Valor i-ésimo promedio de turbidez medido en [NTU]; *E. Coli*<sub>i</sub>: Valor i-ésimo promedio de presencia de coliformes fecales *E. Coli* medido en [UFC]



**Figura 7.** Representación de la remoción de contaminantes, medidos por los parámetros (a)

DQO, (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales *E. Coli*.



Al igual que en las fuentes de agua anteriores, la Tabla 14 muestra el análisis estadístico de varianza ANOVA para los parámetros de interés.

**Tabla 14.** Análisis de varianza (ANOVA) realizado para los parámetros medidos (a) DQO (b) Turbidez y (c) E. Coli finalizados los tres sets de muestreo.

**(a) Demanda Química de Oxígeno**

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17.00	155716.08	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5.00	112623.30	22524.66	6.27	3.11
<b>Error</b>	12.00	43092.78	3591.07	-	-

**(b) Turbidez**

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17.00	68.19	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5.00	40.43	8.09	3.49	3.11
<b>Error</b>	12.00	27.77	2.31	-	-

**(c) Presencia de Coliformes Fecales (E. Coli)**

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
<b>Total</b>	17.00	187646.00	-	-	-
<b>Tratamiento</b>	5.00	123694.67	24738.93	4.64	3.11
<b>Error</b>	12.00	63951.33	5329.28	-	-

FV: Fuentes de variación; GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; FC: Número de Fischer calculado; FT: Número de Fischer tabulado.

Ya que se cumple la condición [3], se procede a realizar la prueba de significación estadística de Tukey, del cual se ha obtenido los siguientes resultados:

**Tabla 15.** Resultados de la prueba de significación estadística de Tukey, para las variables (a) DQO (b) Turbidez y (c) Presencia de coliformes fecales (*E. Coli*). Los tratamientos que han presentado similar remoción de contaminantes se han clasificado en el mismo rango, donde la clasificación A representa al mejor tratamiento.

**(a) Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Muestra	P2	P3	P4	P1	P5	P0
T. Medio	232.15	307.16	366.60	406.83	420.89	473.26
Rango	A	B	B	B	B	B

**(b) Turbidez**

Muestra	P3	P4	P2	P1	P5	P0
T. Medio	1.35	1.91	2.72	3.07	3.13	12.43
Rango	A	B	B	B	B	C

**(c) Presencia de coliformes fecales (*E. Coli*)**

Muestra	P5	P4	P3	P2	P1	P0
T. Medio	10.00	21.33	22.00	40.00	46.67	250.00
Rango	A	B	B	B	B	C

$P_i$ : Tratamiento *i*-ésimo empleando los distintos tamaños de partícula de la semilla *Moringa oleifera* Lam.  $P_0$ : Muestra testigo.

La Tabla 15 (a) muestra que el tratamiento con rango de tamaño de partícula P2 (1000  $\mu\text{m}$ ) se ha clasificado en un rango diferente que los demás tratamientos; este resultado no prueba que los anteriores tratamientos sean malos; como se puede ver, todos han funcionado ya que se ha logrado la reducción de cierto porcentaje de DQO en las unidades experimentales; sin embargo, la prueba de Tukey claramente indica que con el 51% de remoción, el tratamiento  $P_2$  utiliza el tamaño óptimo de partícula en la remoción de materia orgánica del Río San Pedro. Con respecto a turbidez, la Tabla 15 (b) muestra que todos los tratamientos aplicados han sido eficaces; muestra de ello es el 75% de remoción alcanzado por el “peor” de los tratamientos; y a su vez, el 89% de remoción en el mejor de ellos. De esta manera, es posible determinar una diferencia de 14 puntos entre el mejor y el peor de los tratamientos utilizados;

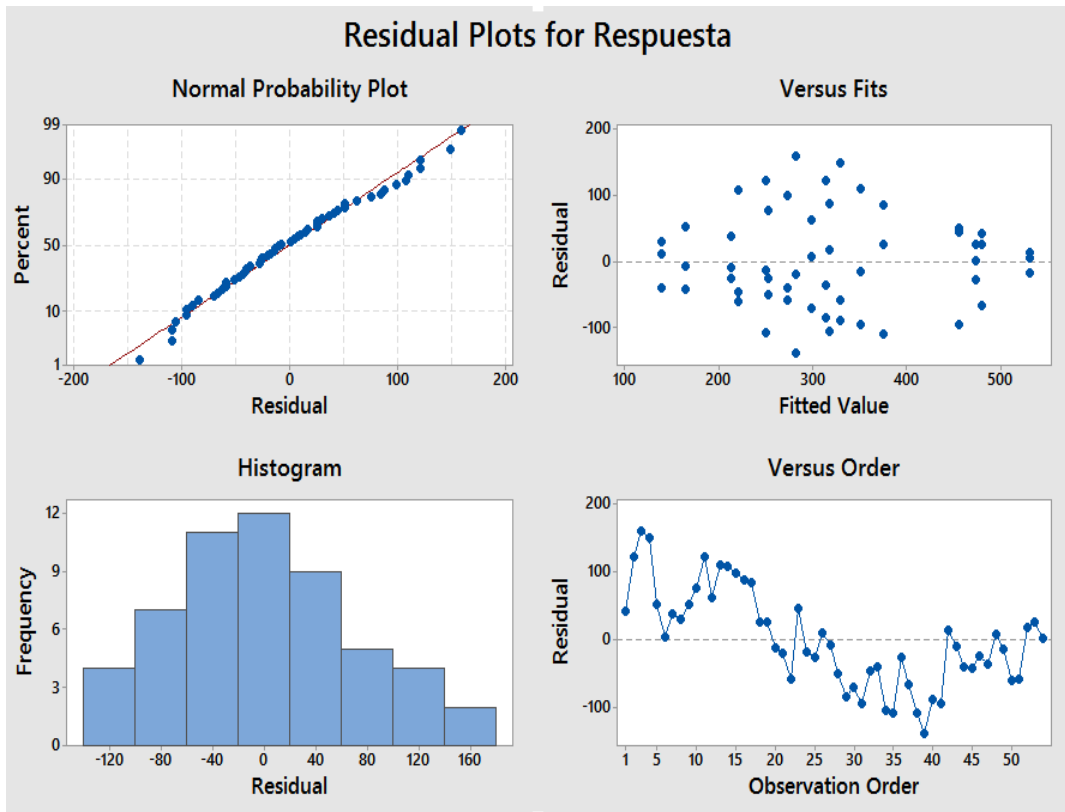
razón por la cual, la prueba de Tukey ha clasificado a todos los tratamientos en un mismo rango. Finalmente, con respecto a la remoción de coliformes fecales, la Tabla 15 (c) muestra la efectividad de la semilla en su acción bactericida. De manera similar a la prueba de turbidez, en el mejor de los tratamientos se alcanza un 96% de remoción de coliformes, mientras que en el “peor” de los tratamientos se alcanza una remoción del 81%; esto implica una diferencia de 15 puntos entre el mejor y el peor tratamiento, lo cual se refleja en el rango de los tratamientos, todos clasificados en un mismo rango.

Para finalizar el trabajo estadístico, se realiza un último análisis, el cual engloba los parámetros DQO, turbidez, *E. Coli*, junto con las tres fuentes de agua analizadas, a este análisis de varianza se lo conoce como “factorial”; y sus resultados se muestran a continuación.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	621648	36568	4.86	0.000
Linear	7	572695	81814	10.87	0.000
Ríos	2	231073	115537	15.35	0.000
Tamaño de Partícula	5	341622	68324	9.08	0.000
2-Way Interactions	10	48953	4895	0.65	0.761
Ríos*Tamaño de Partícula	10	48953	4895	0.65	0.761
Error	36	270908	7525		
Total	53	892556			

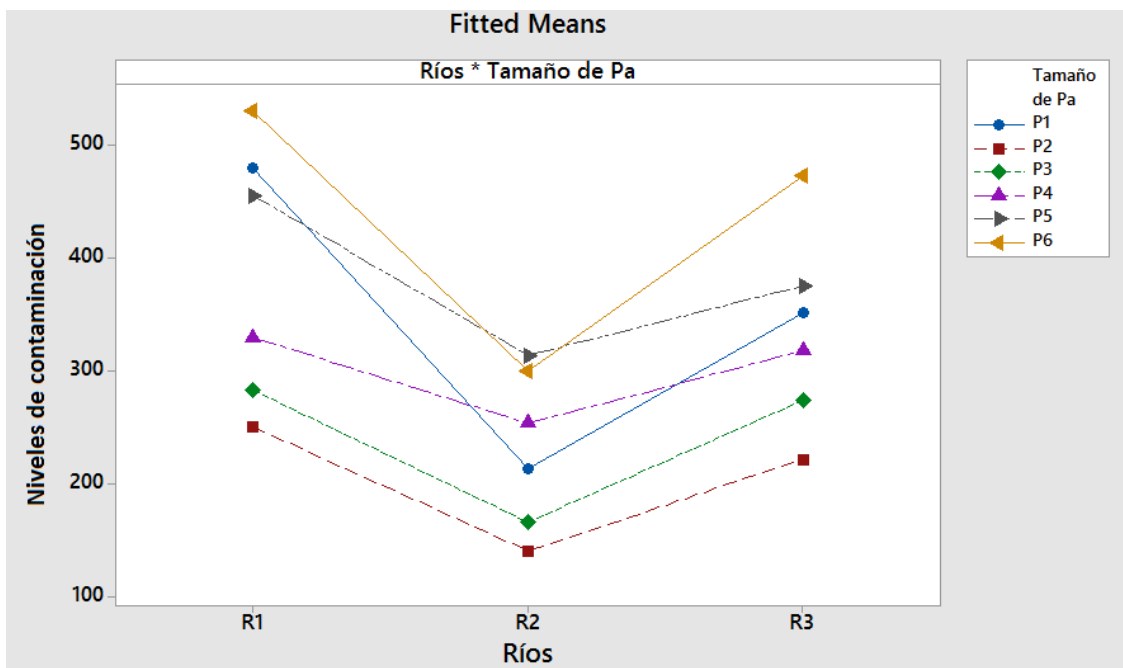
**Figura 8.** Análisis de varianza para el experimento factorial en el que se estudia la interacción entre los factores ríos y tamaño de partícula.

Así también se realiza un gráfico de residuales con el fin de determinar la calidad del ajuste en la regresión y en el ANOVA y nos permitirá conocer si se obtendrán resultados con mínima varianza, es decir resultados confiables.



**Figura 9.** Gráfica de residuales realizado para determinan la calidad de ajuste de datos.

Se puede observar de la gráfica de normalidad, los residuales presentan una distribución normal, estos indican la diferencia existente entre la media muestral y el valor medido. Estos resultados muestran que el ANOVA para el experimento factorial es confiable. También se ha realizado un estudio de la interacción entre los factores ríos y tamaño de partícula, la interacción entre cada factor principal se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Interacción entre rango de tamaño de partícula y fuentes de agua.

Los resultados que se muestran en la Figura 10, permiten analizar el efecto de la interacción entre los tres principales parámetros medidos, con las fuentes de agua tratada: Río Monjas, San Pedro y el efluente de la PPRA de la EPMAPS. Se puede ver que, de manera global, los diferentes tratamientos aplicados al agua cruda, han ayudado a mejorar la calidad de la misma, reduciendo de manera considerable las variables DQO, turbidez y *E. Coli*. Según publicaciones anteriores, se ha visto que existe cierta relación entre la DQO y la turbidez, ya que como se ha mencionado en la sección introductoria, la presencia de partículas coloidales tiene dos posibles orígenes: orgánico o inorgánico [27], y mediante los resultados encontrados de DQO, se puede saber que existe un alto origen por vía orgánica. El efecto floculación-coagulación remueve las partículas coloidales, de manera que la DQO también se ve reducida a medida que la turbidez disminuye; sin embargo, cabe recalcar que la proporción de remoción es menor en DQO que en turbidez, ya que en estudios previos se ha visto que la semilla de *Moringa oleifera* es aportante de cierta cantidad de materia orgánica [28], muestra de ello es el tratamiento P<sub>5</sub> (uno de los menos efectivos), el cual incrementa la DQO. En

cuanto a presencia de coliformes fecales (*E. Coli*) se ha podido ver que el efecto bactericida es altamente eficaz, lo cual lleva a debatir acerca de las proteínas que hacen acreedoras de este efecto a dicha semilla. Se conoce que *Escherichia coli* posee una pared celular gram-negativa [29], la cual actúa como una barrea a un sinnúmero de sustancias incluidos antibioticos. Por esta razón se infiere que las proteínas contenidas en la semilla son de carga positiva, tal como se muestra en el estudio de la Agencia de Cooperación Técnica Alemana de Eschborn, en donde se han identificado a las sustancias bactericidas presentes en las semillas de Moringa: pterygospermina, la moringina y los glicósidos 4- ( $\alpha$ -L-ramnosiloxi) -bencilisotiocianato y 4- ( $\alpha$ -L-ramnosiloxi) -fenilacetoniitrilo [30].

#### 4. Conclusiones

Cada vez se necesitan más fuentes de agua potable para lograr abastecer la demanda mundial, especialmente en zonas rurales y zonas carentes de servicios básicos; por ello, se ha trabajado con semillas de *Moringa oleifera*, como una alternativa a los tratamientos químicos tradicionales de purificación del agua. La semilla de *Moringa oleifera* tiene el potencial para considerarse como una adecuada tecnología de bajo costo disponible para la remoción de contaminantes en aguas residuales.

En este proyecto se prueba el efecto de diferentes rangos de tamaños de partícula de *Moringa oleifera* Lam. en el mejoramiento de la calidad del agua, medida en variables como DQO, turbidez y *E. Coli*. Se ha visto que independientemente de la fuente de agua, la influencia de la partícula P<sub>2</sub>, de tamaño 1000  $\mu$ m ha causado las mejores remociones de estas variables, logrando disminuir e igualar los parámetros aceptados por la normativa tulas en cuanto a DQO, turbidez y unidades formadoras de colonias de *E. Coli*. Se puede concluir que el diseño experimental permitió optimizar los recursos disponibles, disminuir tratamientos sin descuidar el grado de significación global del experimento.

Finalmente, se concluye que la calidad de las aguas ha mejorado, logrando una reducción del 54% de la DQO de los tres cuerpos de agua analizados, más 80% en turbidez y más del 90% en remoción de *E. Coli*, con el mejor de los tratamientos.

## 5. Referencias bibliográficas

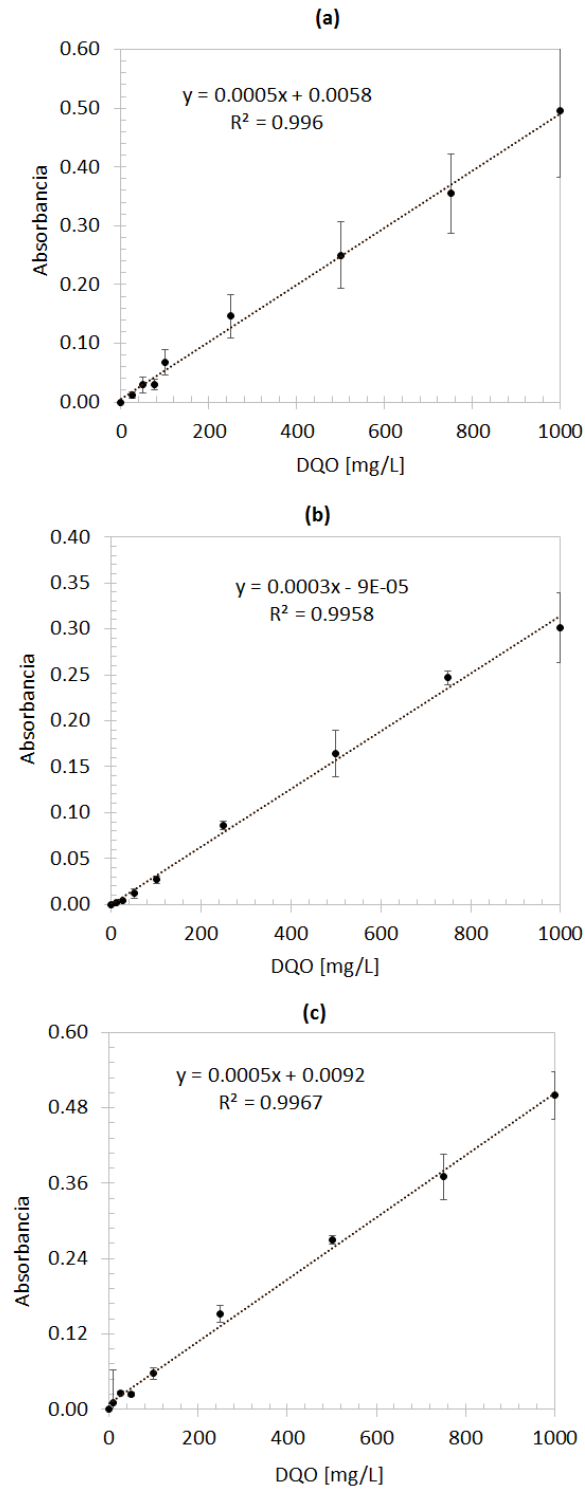
- [1] EPMAPS, “Obras de Intercepción y Tratamiento de las Aguas Residuales para Quito y sus Parroquias”, 2016.
- [2] F. Guzmán-Colis, G. Ramírez-López, E. Thalasso, “Universidad y ciencia Artículos Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes”, *SciELO*, pp. 1–14, 2011.
- [3] Comercio, “Cuatro ríos soportan la descarga de las aguas residuales de Quito”, 2016. .
- [4] T. G. Ā. Kazi *et al.*, “Ecotoxicology and Environmental Safety Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques : A case study”, vol. 72, pp. 301–309, 2009.
- [5] H. S. Xu, Z. X. Xu, W. Wu, y F. F. Tang, “Procedia Environmental Assessment and Spatiotemporal Variation Analysis of Water Quality in the Zhangweinan River Basin , China”, vol. 8, núm. 2011, 2012.
- [6] I. Real Tech, “Chemical Oxygen Demand ( COD )”, 2017. .
- [7] S. Tiwari, “Water Quality Parameters – A Review”, vol. I, núm. Ix, pp. 319–324, 2015.
- [8] J. Sánchez-Martín, J. Beltrán-Heredia, J. Peres, “IMPROVEMENT OF THE FLOCCULATION PROCESS IN WATER TREATMENT BY USING *Moringa oleifera* SEEDS EXTRACT”, vol. 29, núm. 3, pp. 495–501, 2012.
- [9] B. Sciences, “ANTIMICROBIAL PROFILE OF MORINGA OLEIFERA LAM . EXTRACTS AGAINST SOME FOOD – BORNE MICROORGANISMS”, vol. 3, núm. 1, pp. 43–48, 2010.
- [10] E. W. Rice, R. J. Karlin, y M. J. Allen, “*Escherichia coli* : the best biological drinking water indicator for public health protection”, 2000.
- [11] M. Pritchard, T. Craven, T. Mkandawire, A. S. Edmondson, y J. G. O. Neill, “A study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringa oleifera* in drinking water



- purification”, *Phys. Chem. Earth*, vol. 35, núm. 13–14, pp. 791–797, 2010.
- [12] M. S. M, C. S. G, y P. D. Raut, “Use of *Moringa oleifera* ( Drumstick ) seed as Natural Absorbent and an Antimicrobial agent for Ground water Treatment”, vol. 1, núm. 3, pp. 31–40, 2012.
- [13] J. Sánchez-Martín, J. Beltrán-Heredia, y J. A. Peres, “Improvement of the flocculation process in water treatment by using *Moringa oleifera* seeds extract”, *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 29, núm. 3, pp. 495–501, 2012.
- [14] P. Egbuikwem y A. Sangodoyin, “Coagulation Efficacy of *Moringa oleifera* Seed Extract Compared to Alum for Removal of Turbidity and *E. coli* in Three Different Water Sources.”, *Eur. Int. J. Sci. Technol.*, vol. 2, núm. 7, pp. 13–20, 2013.
- [15] E. I. Melo y V. N. Alves, “*Moringa oleifera* Lam. Seeds as a Natural Solid Adsorbent for Removal of AgI in Aqueous Solutions”, vol. 21, núm. 9, pp. 1727–1732, 2010.
- [16] B. Anselme, K; Subba, N; Talbot, “ACTIVE AGENTS AND MECHANISM OF COAGULATION OF TURBID WATERS USING MORINGA OLEIFERA ”, vol. 10, 1993.
- [17] A. Bahrudeen, “Water Treatment Coagulation”, 2017.
- [18] M. Golestanbagh, I. S. Ahamad, A. Idris, y R. Yunus, “Turbidity Removal Using *Moringa* Environmentally Friendly Coagulant *Oleifera* Seeds As”, núm. July 2015, 2016.
- [19] M. Balakrishana y M. Ramanaiah, “Physicochemical Characteristics of River Water and its Treatment Technology Using *Moringa* Seeds as A Coagulant”, *Indian J. Appl. Res.*, vol. 4, núm. 5, pp. 259–262, 2014.
- [20] H. Farrokhzadeh, E. Taheri, A. Ebrahimi, A. Fatehizadeh, M. V Dastjerdi, y B. Bina, “Effectiveness of *Moringa oleifera* powder in removal of heavy metals from aqueous solutions”, *Fresenius Environ. Bull.*, vol. 22, núm. 5 A, pp. 1516–1523, 2013.

- [21] G. Hitzschky, F. Vieira, J. A. Mourão, Â. M. Ângelo, y R. A. Costa, “ANTIBACTERIAL EFFECT ( in vitro ) OF Moringa oleifera AND Annona muricata AGAINST GRAM POSITIVE AND GRAM NEGATIVE BACTERIA”, vol. 52, núm. 3, pp. 129–132, 2010.
- [22] M. Osman, “Waste Water Treatment in Chemical Industries: The Concept and Current Technologies”, *J. Waste Water Treat. Anal.*, vol. 5, núm. 1, pp. 1–12, 2014.
- [23] W. F. Mccoy y B. H. Olson, “RELATIONSHIP AMONG TURBIDITY , PARTICLE COUNTS AND BACTERIOLOGICAL QUALITY WITHIN WATER DISTRIBUTION LINES”, vol. 20, núm. 8, pp. 1023–1029, 1986.
- [24] B. Z. Satterfield, “Jar Testing”, *Natl. Environ. Serv. Cent.*, 2004.
- [25] J. Davis, “What causes foam in streams and lakes”, Talkeetna, 2017.
- [26] N. T. I. 110598 Ecuatoriana, “Anexo 1 del libro vi del texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente: norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua”, en *Legislación secundaria del ministerio del ambiente: norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua*, 2016.
- [27] O. Elizabeth y K. C. Mynepalli, “USE OF MORINGA OLEIFERA ( LAM .) SEED POWDER AS A COAGULANT FOR PURIFICATION OF WATER FROM”, vol. 9, núm. 24, pp. 214–229, 2013.
- [28] K. Annoldsson, Emelie. Bergman, Maria. Matsinhe, Nelson. Persson, “ASSESSMENT OF DRINKING WATER TREATMENT USING MORINGA OLEIFERA NATURAL COAGULANT”, pp. 137–150, 2008.
- [29] O. D. Omodamiro, C. I. Nwankwo, y E. U. Ejiofor, “Antimicrobial and Coagulant Property of Moringa oleifera Seed in Water Purification”, vol. 1, pp. 279–287, 2014.
- [30] S. Al, A. Jahn, H. A. Musnad, y H. Burgstaller, “The tree that purifies water : Cultivating multipurpose Moringaceae in the Sudan”, núm. 152, pp. 1–5, 2017.

## 6. Anexos



**Figura 11.** Curvas de calibración realizadas para la medición de la variable DQO en las fechas (i) (ii) (iii) indicadas en la sección 4.1.