



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

---

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“TRATAMIENTO DE DRENAJE ÁCIDO DEL DEPÓSITO  
DE DESMONTE UNSUITABLE IV YANACOCCHA NORTE  
POR EL PROCESO DE HUMEDALES EN SERPENTÍN”

Tesis para optar el título profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

**Autor:**

Bach. Huamán Chávez Clinton Ener

**Asesor:**

Msc. Ing. Deicy Sánchez Espinoza

Cajamarca – Perú

2018

## APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por el Bachiller **Clinton Ener Huamán Chávez**, denominada:

### **“TRATAMIENTO DE DRENAJE ÁCIDO DEL DEPÓSITO DE DESMONTE UNSUITABLE IV YANACOCCHA NORTE DE MINA POR EL PROCESO DE HUMEDALES EN SERPENTÍN**

---

Msc.Ing. Deicy Sánchez Espinoza  
**ASESOR**

---

Ing. Víctor Eduardo Alvarez León  
**JURADO**  
**PRESIDENTE**

---

Ing. Rafael Napoleón Ocas Boñon  
**JURADO**

---

Ing. Alex Patricio Marinovic Pulido  
**JURADO**

## DEDICATORIA

A Juan y Carmen, Manuel y Emérita, mis padres,  
Por el constante apoyo y motivación.  
A mi hermano.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida y permitir concretar esta esta etapa en mi vida, por ayudarme a superar todas las dificultades a lo largo de este tiempo.

Agradecido con mis padres, hermano, hijo, esposa, tíos, por creer en mí y apoyarme en los buenos y malos momentos que pase para lograr este objetivo.

Reconocimiento al Ingeniero Gilmar Guzmán Salvador por compartir su experiencia y su tiempo para poder lograr terminar el presente trabajo.

Agradezco a todas las personas que laboran en el laboratorio metalúrgico de Yanacocha que con sus consejos, apoyo y experiencia me ayudaron tanto en mi formación profesional como en lo personal.

Agradezco a mi asesora Ingeniera Deicy por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de esta tesis, por su apoyo y amistad que me permitieron aprender mucho más que lo estudiado en el proyecto.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>APROBACIÓN DE LA TESIS.....</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
1.1. Realidad problemática .....	12
1.2. Formulación del problema.....	13
1.3. Justificación.....	13
1.4. Limitaciones .....	13
1.5. Objetivos .....	14
1.5.1. <i>Objetivo general</i> .....	14
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	14
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1. Antecedentes .....	15
2.2. Bases teóricas.....	17
2.2.1. <i>Área de Estudio</i> .....	17
2.2.2. <i>Humedales Naturales</i> .....	21
2.2.3. <i>Mecanismo de generación de aguas ácidas</i> .....	21
2.2.4. <i>Etapas en la formación de aguas ácidas</i> .....	22
2.2.5. <i>Zona aeróbica y anaeróbica en un pantano artificial (Humedal)</i> .....	24
2.2.6. <i>Mecanismos de bacterias sulfato reductoras</i> .....	26
2.2.7. <i>Selección del área para la construcción de un pantano artificial</i> .....	26
2.2.8. <i>Diseño hidráulico de un pantano artificial</i> .....	28
2.2.9. <i>Substratos del pantano artificial</i> .....	29
2.2.10. <i>Plantas acuáticas</i> .....	30
2.2.11. <i>Procesos involucrados en los pantanos artificiales</i> .....	34
2.2.12. <i>Criterios para la construcción de un pantano artificial</i> .....	35
2.3. Definición de términos básicos .....	36
2.4. Hipótesis .....	37
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>38</b>

3.1.	Operacionalización de variables .....	38
3.2.	Diseño de investigación .....	38
3.3.	Unidad de estudio .....	38
3.4.	Población .....	38
3.5.	Muestra (muestreo o selección).....	39
3.6.	Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos .....	39
	<i>Recolección de muestras</i> .....	39
	<i>Experimento N° 1: Prueba en Balde.</i> .....	39
3.6.1.	<i>Experimento N° 2: Prueba en humedal</i> .....	44
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....</b>		<b>49</b>
4.1.	Resultados de pH primer experimento. ....	49
4.2.	Variación de pH en función a los caudales.....	50
4.3.	Disminución de metales por caudal. ....	51
4.3.1.	<i>Resultados de la disminución de Arsénico en el humedal.</i> .....	51
4.3.2.	<i>Resultados de la disminución de Cadmio en el humedal.</i> .....	52
4.3.3.	<i>Resultados de la disminución de Cromo en el humedal.</i> .....	53
4.3.4.	<i>Resultados de la disminución de Cobre en el humedal.</i> .....	54
4.3.5.	<i>Resultados de la disminución de Hierro en el humedal.</i> .....	55
4.3.6.	<i>Resultados de la disminución de Plomo en el humedal.</i> .....	56
4.3.7.	<i>Resultados de la disminución de Mercurio en el humedal.</i> .....	57
4.3.8.	<i>Resultados de la disminución de Zinc en el humedal.</i> .....	58
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.....</b>		<b>59</b>
5.1.	Incremento del pH en experimento 1.....	59
5.2.	Resultados de pH en los humedales. ....	60
5.3.	Resultados de metales en los humedales. ....	62
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>65</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>66</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>67</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>73</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Variable Dependiente.....	38
Tabla N° 2. Variable Independiente. ....	38
Tabla N° 3. Análisis de varianza del pH.....	50
Tabla N° 4. Análisis de varianza de arsénico.....	51
Tabla N° 5. Análisis de varianza de cadmio.....	52
Tabla N° 6. Análisis de varianza de cromo.....	53
Tabla N° 7. Análisis de varianza de cobre.....	54
Tabla N° 8. Análisis de varianza de Hierro.....	55
Tabla N° 9. Análisis de varianza de plomo.....	56
Tabla N° 10. Análisis de varianza de mercurio.....	57
Tabla N° 11. Análisis de varianza de zinc.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Mapa de ubicación de las cuatro cuencas hidrográficas .....	18
Figura N° 2. Esquema de la formación de aguas ácida.....	24
Figura N° 3. Mecanismo de adsorción de una planta acuática en un humedal .....	32
Figura N° 4 Berro de Agua.....	40
Figura N° 5. Lirio de Jalca.....	40
Figura N° 6. Totorá. ....	41
Figura N° 7. Musgos de Agua .....	42
Figura N° 8. Carrizo de Jalca .....	42
Figura N° 9. Junco .....	43
Figura N° 10. Hydrilla.....	43
Figura N° 11. Construcción del humedal a nivel de laboratorio .....	45
Figura N° 12. Adaptación del humedal a la zona .....	46
Figura N° 13. Colocación de las plantas en el humedal. ....	47
Figura N° 14. pH inicial y final primer experimento.....	49
Figura N° 15. pH de ingreso y salida del humedal .....	50
Figura N° 16. Concentración de As en tres flujos diferentes. ....	51
Figura N° 17. Concentración de Cd en tres flujos diferentes .....	52
Figura N° 18. Concentración de Cr en tres flujos diferentes.....	53
Figura N° 19. Concentración de Cu en tres flujos diferentes. ....	54
Figura N° 20. Concentración de Fe en tres flujos diferentes. ....	55
Figura N° 21. Concentración de Pb en tres flujos diferentes. ....	56
Figura N° 22 Concentración de Hg en tres flujos diferentes. ....	57
Figura N° 23. Concentración de Zn en tres flujos diferentes. ....	58

## RESUMEN

Este trabajo se desarrolló en el laboratorio de Metalurgia-La Quinoa de Compañía Minera Yanacocha, como una alternativa natural para el tratamiento de drenaje ácido en mina con el uso de humedales artificiales en forma de serpentines. La tesis se centra en un caso particular de Yanacocha: El depósito de desmonte unsuitable IV-Yanacocha Norte.

El problema que ocasionaría el drenaje ácido de mina del depósito de desmonte unsuitable IV-Yanacocha Norte, es que de no ser tratada esta agua, la misma podría afectar al ecosistema de la zona, además el sistema de bombeo y el tratamiento de esta agua, a través de la planta de tratamiento de agua ácida es muy costoso. Por ello esta investigación tiene como objetivo: Diseñar y evaluar el uso de un humedal para el tratamiento del drenaje ácido de mina, que permita mejorar el pH y disminuir la concentración de metales para que la descarga de esta agua cumpla con los límites máximos permisibles exigidos por la legislación ambiental peruana. .

El primer experimento se realizó utilizando compost (Yanahumus), agua ácida y tres especies de plantas: *Phragmites australis*, *Hydrilla verticillata*, *Scirpus holoschoenus*, después de una evaluación de tan solo 8 horas el pH había aumentado de 3.4 a 7.2 Con estos resultados se desarrolló la fase 2.

En la segunda fase, se diseñó el humedal artificial. Para el cálculo del área del humedal se utilizó la metodología propuesta por (Skousen et al., 1994; Hedin et al., 1995; Watzlaf, 1997). Sin embargo una vez calculada el área se construyeron 2 humedales adicionales para validar resultados con 3 diferentes caudales (25, 30 y 35 ml/ min respectivamente).

Los humedales se construyeron en forma de serpentín con 4 celdas (cada una de 0.34 m). En la base de cada celda se colocó una capa delgada de cuarzo (Para evitar saturación de lodos), sobre el cuarzo, se colocó 15 cm de alto de Yanahumus, se colocaron las especies anteriormente descritas más la totora y el lirio de jalca en sistema tres bolillo. De acuerdo al flujo en cada prueba, las plantas se encontraron inundadas entre 4 y 6 cm.

Las pruebas fueron desarrolladas en un periodo de 60 días, tomando muestras de pH, y metales totales cada 4 días. Los mejores resultados tanto para incremento de pH y reducción de metales se dieron a los 4 días con el flujo de 25 ml/min. Los resultados del pH no variaron estadísticamente en comparación con los otros caudales, sin embargo existieron diferencias significativas en la disminución de metales en los tratamientos con

caudal de 25, 30 y 35 ml/ min. La disminución en concentración de los principales metales en el agua fue de Cd 91.4%, Cr 97.25 %, Cu 81 %, Fe 97.9%, Pb 27.5% y Zn 85.5% cada uno.

Finalmente, esta tesis muestra cómo se puede aumentar el pH y disminuir la concentración de metales presentes en el agua ácida de mina, a través de un sistema pasivo que minimiza costos, es amigable con el medio ambiente y que puede descargar aguas cumpliendo con los límites máximos permisibles que exige la legislación ambiental peruana. De este modo, esta tesis se convierte en una potencial alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas ácidas en minería.

## ABSTRACT

This work was developed in: La Quinoa Metallurgy laboratory (Yanacocha Mining Company) as a natural alternative for the treatment of acid drainage, with the use of artificial wetlands in the shape of coils. The thesis was focus in the waste rock called unsuitable IV-Yanacocha Norte.

The normal treatment implies the pumping system and the water treatment across the Water Treatment Plant, which is very costly. Thus, this investigation look to design and to evaluate the use of a wetland for the treatment of the acid drainage of mine, which allows to improve the pH and to diminish the metal concentration.

The first experiment was realized using compost (Yanahumus), acid water and three species of plants: *Phragmites australis*, *Hydrilla verticillata*, *Scirpus holoschoenus*, after an evaluation of only 8 hours the pH had increased from 3.4 to 7.2 With these results the phase developed 2.

In the second phase, the artificial wetland was designed. For the calculation of the wetland area, we used the methodology proposed by (Skousen et to., 1994; Hedin et to., 1995; Watzlaf, 1997). Once the area was calculated, two additional wetlands were constructed to validate results with three different flows (25, 30 and 35 ml/min respectively).

The wetlands were constructed in the shape of coil with four cells (each one of 0.34 m). In the base of every cell there was placed a thin cap of quartz (to avoid saturation of muds), on the quartz, 15 cm of Yanahumus and plants.

The test developed in a period of 60 days, took samples of pH, and total metals every 4 days. The best results for increase of pH and metal reduction was with flow of 25 ml/min. The results of the pH did not change statistically in comparison with other flows. Nevertheless, significant differences existed in the metal decrease in the treatments with flow of 25, 30 and 35 ml/min. The decrease in concentration of the principal metals in the water was As (0.6-0.11), Cd 91.4%, Cr 97.25 %, Cu 81 %, Fe 97.9%, Pb 27.5% y Zn 85.5% each one.

Finally, this thesis shows a new technology, which minimizes costs, is friendly with the environment and can discharge water fulfilling the maximum permissible limits, that demands the environmental Peruvian legislation. Thus, this thesis turns into a potential alternative of low cost for the treatment of acid waters into mining industry.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

El drenaje ácido de mina es una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en el mundo (Palmo; et al, 2012). Debido a que las tecnologías actuales demandan de altos costos para este tipo de tratamiento de aguas (Generalmente el uso de Plantas de Tratamiento de Aguas Ácidas – PTAA- y sistemas de bombeo) es necesario, plantear nuevas alternativas que sean menos costosas e igual de eficientes.

Los drenajes ácidos son tóxicos en diverso grado para el ser humano, y todo lo que lo rodea contienen metales disueltos y constituyentes orgánicos solubles e insolubles, que generalmente proceden de antiguas labores mineras, procesos de concentración de minerales, presas de residuos y relaveras de mina. (Hedin, 1994).

El drenaje ácido de mina, puede persistir durante décadas e incluso miles de años una vez finalizado el ciclo productivo, es poco probable que las empresas a cargo de estos sistemas de tratamiento de agua, se queden “de por vida” en las zonas de trabajo (Aunque muchas de ellas lo tienen estipulado dentro de su plan de cierre) (MEM, 2010).

En lo referente a las mineras actualmente en operación y con posibles situaciones de generación de DAM, la problemática se centra en encontrar métodos de prevención, remediación y que minimice los impactos en toda la cadena productiva en donde se pueda generar. La remediación debe ser sostenible, viable y económica en el tiempo para que se pueda también manejar una vez que la mina haya cerrado sus operaciones. (Guerrero, 1998).

En Cajamarca, existen alrededor de 5 empresas mineras grandes (Yanacocha, Goldfields, La Zanja, Coimolache, Shahuindo, etc), las cuales en su totalidad usan sistemas de tratamiento de aguas ácidas y ninguna un tratamiento pasivo como los humedales, además en Hualgayoc, existe un sin número de pasivos ambientales mineros que generan aguas ácidas y el gobierno no tiene la capacidad para implementar un PTAA en cada zona.

Ante esta problemática, nace esta investigación, la cual busca diseñar y evaluar el uso de un Humedal para el tratamiento del drenaje ácido de mina, que permita incrementar el pH y disminuir la concentración de metales cumpliendo con lo exigido por la legislación ambiental peruana.

## 1.2. Formulación del problema

¿El método del tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina en forma de serpentín ayudará al incremento del pH y a la disminución de concentración de metales del depósito de desmonte unsuitable IV-Yanacocha Norte?

## 1.3. Justificación

En comparación con la mayoría de las actividades industriales y agrícolas, la explotación minera es la que menos consume agua. Sin embargo esta actividad libera grandes cantidades de agua que de no ser tratadas podrían ser no deseables.

La generación de aguas acidas de mina es un problema ambiental y social, debido a que si éstas llegan a ser descargadas al medio ambiente podrían afectar al ecosistema dejando áreas desérticas y con serios impactos ambientales al agua, suelo, flora, fauna, etc. Debido a ello la mayoría de empresas mineras utilizan las tecnologías de tratamiento activo continuo como las ya nombradas PTAA, las cuales son costosas y no rentables a largo tiempo.

Por ello, esta tesis propone diseñar y evaluar el funcionamiento de un sistema pasivo "Humedal en serpentín", que sea capaz de incrementar el pH y disminuir la concentración de metales presentes en el agua del depósito de desmonte unsuitable IV ubicado en Yanacocha Norte, de manera que puedan cumplir con los límites máximos permisibles que exige la legislación ambiental peruana.

## 1.4. Limitaciones

- Limitado acceso a publicación de información del punto de descarga unsuitable IV por políticas de la empresa.
- No poder realizar una prueba a gran escala del humedal para corroborar los datos a nivel piloto.
- No haber conseguido más plantas que ayuden a mejorar aún más la calidad del efluente.
- Limitación en el tiempo y número de muestras a ser procesadas para metales totales.
- Poco tiempo para la toma de muestras de los 3 humedales.
- Haber hecho una comparación del humedal realizado con un humedal de la compañía.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

- Diseñar y evaluar el uso de un humedal en serpentín, que permita incrementar el pH y disminuir la concentración de metales del agua ácida proveniente del depósito de desmonte unsuitable IV Yanacocha.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar el drenaje ácido de mina del depósito de desmonte unsuitable IV Yanacocha Norte.
- Determinar si la combinación de plantas más el yanahumus puede mejorar la calidad del efluente.
- Determinar el área adecuada y caudal para funcionamiento del humedal.
- Evaluar el incremento del pH en los diferentes tratamientos.
- Evaluar el incremento del caudal en los 3 humedales construidos.
- Evaluar la remoción de metales en los diferentes tratamientos para comparar con los LMP.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

La universidad de Manizales-Colombia, realizó un estudio sobre el DAM de la Mina Cascabel ubicada en el Municipio de Marmato Caldas, importante zona minera de Colombia, que hasta ese momento no realiza ningún tipo de tratamiento a las aguas residuales de sus procesos mineros. Los investigadores implementaron en prueba piloto un tratamiento inicial al drenaje de la mina con el fin de determinar qué impacto ambiental benéfico ocasionaría. Este tratamiento consistió en un sistema reductor y productores de alcalinidad tipo humedal, en el que se utilizó Hidróxido de Sodio, que además de neutralizar las aguas ácidas, perjudican la oxidación de los sulfuros y elimina los metales pesados volviéndolos insolubles. Después de realizar los análisis del agua tratada se encontró que se reduce la presencia de algunos elementos como: cobre, hierro, aluminio, cadmio, manganeso, zinc; aunque se reduce la concentración de estos metales sólo el aluminio, cobre y el hierro quedaron con valores por debajo de los permitidos mientras los demás (cadmio, manganeso y zinc) no cumplieron con lo permitido por la legislación colombiana. De estos resultados se planteó realizar más investigaciones para un tratamiento posterior que pueda disminuir a niveles aceptables los metales aún presentes (Díaz, 2013).

La Universidad Nacional de Ingeniería en el año de 2011, llevo a cabo una investigación en la que se evaluó el tratamiento de efluentes de la mina Comarsa, por el método pasivo de pantanos artificiales. Se aplicaron diversas técnicas para el tratamiento de drenaje ácido de mina siempre apoyada en métodos pasivos. Para la iniciación de la experimentación se recolecto información de los puntos de descarga de ácido de mina y luego hizo pruebas para la neutralización del efluente con caliza a una granulometría diferente para ver cuál es la que le conviene a un nivel laboratorio. Luego de ello empezó a probar compost, aserrín, tierra negra, estiércol de manera independientemente cada uno en celdas diferentes y así evaluar cuál de ellos generaba mejores resultados en incrementos de pH y disminución de metales. También creo un canal de aireación para que el  $Fe^{+2}$  pase a  $Fe^{+3}$  y así sea más fácil el proceso de eliminación o absorción del mismo cuando interactúen con las plantas. Los resultados que se obtuvieron a escala piloto fueron que al cabo de 60 días consecutivos, en los que se mostraron resultados positivos con todos los estratos ya sean independientes o combinados. Según la configuración definida para cada substrato por donde atravesaba el agua ácida se han obtenido valores físicos y

químicos en relación a la calidad de agua después que circula por cada celda de substratos. La investigación concluyó que el pH final a la salida de las celdas de plantas acuáticas incrementó a un rango de 6.5 a 7.5 con un promedio de 7.0, observándose claramente la tendencia del pH a incrementarse. (Blancas, 2011).

La Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, realizó una investigación de tratamiento de humedales artificiales, en el área de monitoreo y control ambiental de la compañía minera Antamina S.A. El humedal se construyó en la quebrada de Tucuchs trató las aguas de escorrentía provenientes del botadero de material C. El humedal contaba con 30 celdas con diferentes funciones las especies utilizadas fueron juncos y perla de río. Para el diseño del humedal, se construyó una poza de sedimentación de 6887 m<sup>3</sup> que reducía la velocidad del flujo donde sedimenta partículas grandes como arenas; la segunda estructura fue en forma de serpentín y tuvo 12,683m<sup>2</sup> la cual sirvió para disminuir aún más el flujo y sedimentar partículas más finas como son los limos. En la última celda el humedal tuvo de 4.2Ha y allí se realizaban los procesos de oxidación, reducción, precipitación, absorción y adsorción. Los resultados fueron favorables ya que la remoción del nitrato del sistema fue de 23% y del amonio 57.7% a abril de 2007. (Vifian, 2007).

En la Universidad del Centro del Perú se realizó una investigación a nivel de laboratorio para reducir la concentración de Fe y Mn de aguas ácidas, con el uso de una columna de alcalinización y un sistema de humedal. Se construyó una columna con relleno travertino de un diámetro de 20 cm y una altura de 150 cm rellena de 10,5 kg travertino, esto permitió llevar el pH desde 2,8 hasta 7,2 y también se disminuyó el contenido de fierro de 77,79 ppm hasta 4,75 ppm. Sin embargo, el contenido de manganeso no se redujo en la columna. Por consiguiente para reducir el contenido de manganeso se construyó un estanque de humedal con totora como bioextractor, en forma de paralelepípedo, de 2 m de largo, de 0,8 m de ancho y 0,5 m de altura. Obteniéndose una disminución del contenido de manganeso de 17,73 ppm hasta 0,205 ppm, así como el contenido de hierro disminuyó 3,73 ppm. El caudal se mantuvo constante a 15 mL/min, la temperatura constante a 16 °C, presión atmosférica de 520 mmHg (condiciones de Huancayo). Las variables manipuladas en ese trabajo fueron: el diámetro de partícula de travertino para relleno de columna y la longitud de recorrido en el estanque de humedal. Finalmente se determinó el tamaño óptimo de partícula de travertino de 0,75 pulgadas para el relleno de columna esto fue de manera experimental. La longitud recorrida en el sistema de humedal fue de 3,2 m lineales. (Córdova y Rojas, 2015).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Área de Estudio**

#### **2.2.1.1 Generalidades**

Minera Yanacocha es la mina de oro más grande de Sudamérica, ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca, a 800 kilómetros al noreste de Lima, dedicada a la extracción de oro y plata por métodos de gran minería a tajo abierto. Sus operaciones se encuentran a 45 kilómetros al norte del distrito de Cajamarca, dentro de cuatro cuencas: Quebrada Honda, Río Chonta, Río Porcón y Río Rejo. A finales de los 80s e inicios de lo 90s, Newmont exploró la zona ubicada al norte de Cajamarca, logrando identificar zonas mineralizadas. Una vez descubierta, el área de geología de la mina realizó estudios más detallados que le permitieron identificar cantidades precisas de mineral. (Yanacocha, 2013).

En 1992 fue constituida legalmente la empresa Minera Yanacocha S.R.L., llegando a producir la primera barra de doré el 7 de agosto de 1993 proveniente del tajo Carachugo. La empresa está conformada por los siguientes accionistas: Newmont Mining Corporation - 51,35% y Compañía de Minas Buenaventura - 48,65%. El yacimiento lo componen cinco minas a cielo abierto, cuatro plataformas de lixiviación y tres plantas de recuperación de oro. Se trata del yacimiento más importante de América Latina, pues en 2005 se produjeron 3 333 088 onzas del preciado metal. Sin embargo, durante los últimos años Yanacocha ha experimentado una caída en su producción debido al agotamiento de las reservas. El mineral que produce Yanacocha se vende en su totalidad en el mercado spot, a refinerías de clase mundial y bajo estándares internacionales de calidad, seguridad y protección del medio ambiente. (Yanacocha, 2009).

#### **2.2.1.2 Ubicación y Acceso**

Minera Yanacocha se ubica en la Provincia y Departamento de Cajamarca sobre la Cordillera de Los Andes, al norte del Perú, con una localización aproximada de 7° Latitud Sur y 78°30' Longitud Oeste, aproximadamente a 32 kilómetros al norte de la ciudad de Cajamarca, por carretera. Toda la propiedad comprende un área de más de 175 000 hectáreas. Con elevaciones que van desde los 3 700 hasta los 4 100 msnm. El acceso a la mina desde la ciudad de Cajamarca es a través de una vía asfaltada y toma aproximadamente una hora. (Yanacocha, 2006)

El distrito está ubicado en la línea divisoria continental, separando arroyos que drenan hacia el este dentro de la Cuenca del Amazonas y luego al Océano Atlántico (en las cuencas de Porcón, Chonta y Honda).

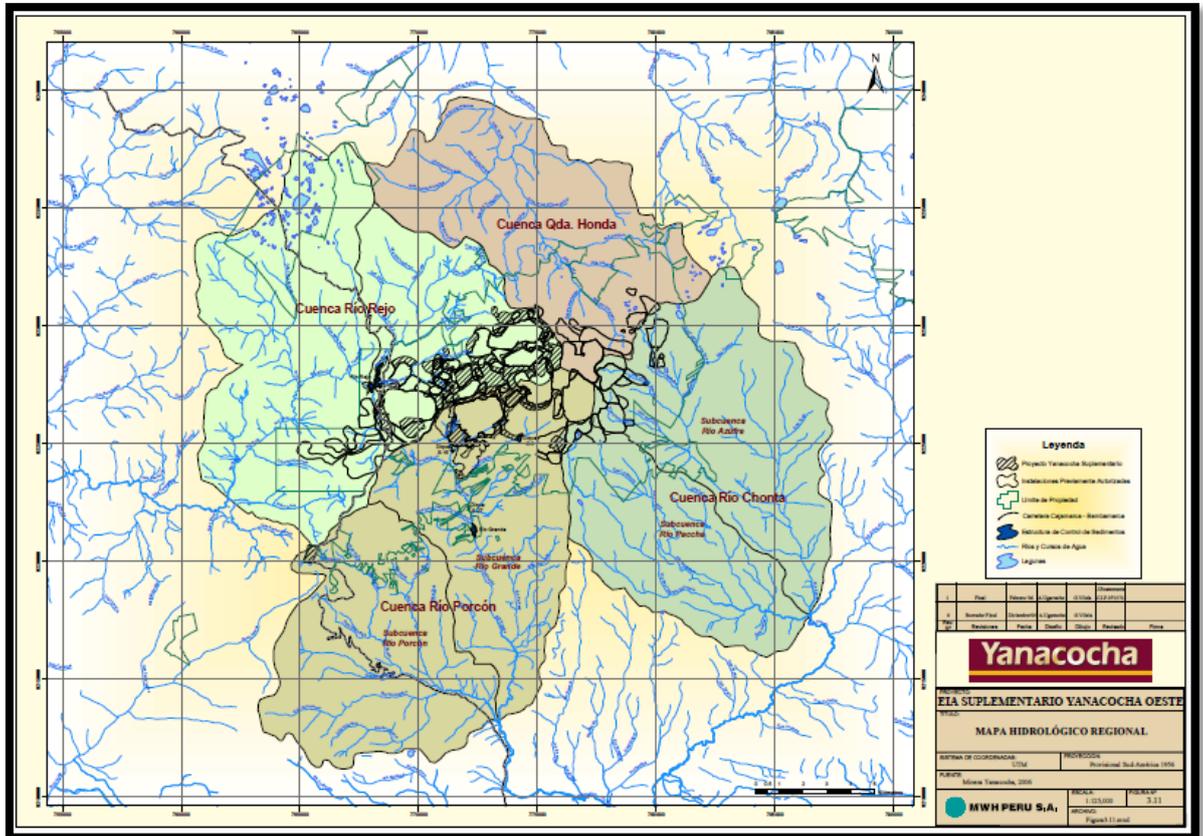


Figura N° 1. Mapa de ubicación de las cuatro cuencas hidrográficas. Yanacocha, 2006.

### 2.2.1.3 Geología General

El Distrito de Yanacocha está centrado en unidades volcánicas intermedias a ácidas del Eoceno al Mioceno conocidas como Complejo del Domo de Flujo Yanacocha. La geología refleja los procesos activos tectónicos y volcánicos de los Andes. En el distrito minero, hubo erupciones de magma con sílice o ácido a lo largo de fallas estructurales, produciendo estructuras de domo en el flujo. Estas composiciones de sílice fueron mineralizadas por soluciones hidrotérmicas ricas en oro y, dado que estas composiciones contienen oro, son el objetivo principal de la extracción.

Las rocas contienen predominantemente cuarzo, alunita  $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ , además de arcillas. La mineralización aurífera estuvo acompañada de pirita,

enargita  $\text{Cu}_3(\text{As,Sb})\text{S}_4$ , y otros minerales sulfúricos de cobre (covellita, digenita y chalcocita). El mineral contiene niveles elevados de arsénico, 130 mg/kg, y plomo, 630 mg/kg, además de bajos niveles de cobre, 41 mg/kg, mercurio, 8.6 mg/kg, zinc, 25 mg/kg, y molibdeno, 25 mg/kg. (Turner, 1997).

En el Distrito Minero de Yanacocha, las formas de sílice están casi totalmente oxidadas. Alrededor de estas formas hay zonas argílicas avanzadas, y alteración argílica, que no contienen oro, sino que contienen minerales de sulfuro sin oxidar, teniendo potencial de generar ácido. La profundidad de oxidación (la profundidad donde predominan los minerales de sulfuro) varía en toda la zona, fluctuando entre más de 200 m en Yanacocha Sur, hasta 150 m en el centro de Maqui Maqui, hasta la exposición superficial de minerales de sulfuro en márgenes de Yanacocha Norte. No se han encontrado zonas de sulfuro bajo los yacimientos de Carachugo o San José en perforaciones de 300 m de profundidad. En esta profundidad, la roca empieza a ceder y se mezclan los óxidos con sulfuros, conformando la zona transicional de 50 a 60 m de espesor. Debajo de la zona transicional, las formas minerales de oro continúan contenidas en sulfuros primarios. (Yanacocha, 2006).

#### 2.2.1.4 Componentes generales de mina

- **Tajos**

El minado de Tajo Abierto se realiza cuando los yacimientos son de gran tamaño como es el caso de Yanacocha, presentan una forma regular, y están ubicados en la superficie o cerca de ésta. Este es un proceso eficiente en la medida en la que el costo de extraer el mineral (incluyendo la movilización de material no comercial que los cubre), sea menor que el precio de comercialización del mineral a extraer. El tajo abierto se ve como un gran tazón y este se va construyendo en la medida en que la operación va avanzando, tanto lateralmente como en profundidad. A medida que se va trabando, se genera una especie de anfiteatro (por su forma escalonada) cuya forma puede ir cambiando en la medida en que avanza la operación. Si bien el concepto de una mina de tajo abierto es sumamente básico, su concepción y desarrollo involucra un planeamiento complejo y costoso. Cabe indicar, además, que

frecuentemente muchas operaciones mineras empiezan como tajo abierto y, cuando llegan a un punto en que el costo de extraer el mineral no cubre el costo de extracción de las rocas aledañas empiezan a utilizar métodos de minería de socavón. (Steinhausler, 2001)

- **PAD de lixiviación**

La pila o PAD de lixiviación es una estructura a manera de pirámide escalonada donde se acumula el mineral extraído. A este material se le aplica, a través de un sistema de goteo, una solución cianurada, la cual disuelve el oro. Mediante un sistema de tuberías colocadas en la base del PAD, la solución disuelta de oro y cianuro – llamada solución rica – pasa a una poza de lixiviación o procesos, desde donde se bombea hacia la planta de procesos. La base del PAD debe estar recubierta por una geomembrana, que es un material plástico de alta resistencia que impide el contacto de los químicos con el suelo, cuidando la calidad del agua. (Wright, 1998).

- **Depósito de material estéril**

Son áreas donde es depositado el material que es extraído del tajo, pero que no contiene mineral de interés. Estos depósitos son los que constituyen fuentes potenciales de generación de drenaje ácido de mina. (Rodríguez, 2007).

### **2.2.1.5 Tratamiento de Aguas Ácidas y de Exceso en Yanacocha**

En el tratamiento de aguas ácidas que están presentes en forma natural en las aguas subterráneas y superficiales se utilizan reactivos tales como carbonato de calcio. Las aguas de exceso se originan en la temporada de lluvias que transcurre entre los meses de octubre y abril. El agua que cae en grandes cantidades sobre la zona de operaciones, ingresa a las pilas de lixiviación y a las pozas de procesos, generando un excedente de agua en el sistema que es necesario liberar ya que afecta el proceso de producción y puede poner en riesgo su capacidad de contención. Estas aguas son tratadas en las AWTP (Acid Water Treatment Plant) y enviadas de regreso al medio ambiente. La planta Yanacocha Norte implementó y mejoró este tratamiento de aguas de exceso incorporando un nuevo sistema con

tecnología de punta denominado Tratamiento de Aguas por Ósmosis Inversa. El agua de exceso, empujada por la presión de un sistema de bombeo, se hace pasar por unas membranas especiales muy finas, las que, sin el uso de reactivos químicos y con una alta eficiencia, atrapan el contenido de metales y otras sustancias, dejando pasar el agua ya libre de elementos perjudiciales para el medio ambiente. (Yanacocha, 2005).

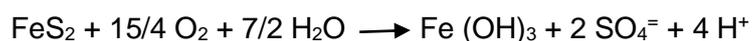
### 2.2.2. Humedales Naturales

Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial auto depurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie. (Villachica, 2004).

Los humedales ocupan el espacio que hay entre los medios húmedos y los medios, generalmente, secos y de que poseen características de ambos, por lo que no pueden ser clasificados categóricamente como acuáticos ni terrestres. Lo característico de un humedal es la presencia de agua durante períodos lo bastante prolongados como para alterar los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna hasta el punto de que el suelo no actúa como en los hábitat acuáticos o terrestres. Las profundidades típicas de estas extensiones de tierras son menores a 0,60 m donde crecen plantas emergentes como juncos, totora que contribuye a la reducción de contaminantes a través de procesos aerobios de degradación. (Hammer y Bastian, 1989).

### 2.2.3. Mecanismo de generación de aguas ácidas

El principal mecanismo responsable de la generación de aguas ácidas es la oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), cuyo proceso se resume en la siguiente ecuación:



Los procesos de meteorización de otros sulfuros metálicos como la esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), etc; extienden a provocar la adición de iones sulfato y de sus metales correspondientes a la solución acuosa. Esto es, considerando un metal divalente genérico,  $\text{M}^{2+}$  la mayoría de los sulfuros se ajustan a la fórmula  $\text{MS}$  y el proceso de meteorización de estos minerales procede



Además, en muchas ocasiones, la acidez de las aguas derivadas de la oxidación de la pirita es tan marcada, que determinados minerales arcillosos logran solubilizarse y pasar a solución, liberando  $Al^{3+}$  al medio hídrico.

Todas estas sustancias químicas introducidas en las aguas son las que van a provocar cambios químicos en ellas, derivando en aguas generalmente de mala calidad por sus elevados contenidos de metales disueltos y su alta acidez. (Younger, 2005).

#### 2.2.4. Etapas en la formación de aguas ácidas.

Los drenajes de minas en operación o abandono generan problemas de contaminación y degradación de los ecosistemas, pudiendo llegar a extinguir la vida acuática. También imposibilita el uso de estas aguas para consumo humano, debido a su acidez y elevada concentración de metales disueltos como hierro, manganeso, aluminio, arsénico, selenio, cinc, níquel, y otros. Por otro lado, genera daños a las estructuras metálicas y de hormigón, así como la destrucción o desaparición de la vegetación y la fauna de los cauces naturales. (Gusek, 2000).

Una forma de evitar la formación de aguas ácidas es la neutralización de las mismas, en este sentido la oxidación de una tonelada de pirita produce casi una tonelada de hidróxido férrico y cerca de tonelada y media de ácido sulfúrico.

El proceso de formación de aguas ácidas, en su conjunto, también se puede explicar en tres etapas, como se observa en la (Figura n° 2). (Nordstrom y Alpers, 2003)

**1ª etapa.** La oxidación de minerales sulfurosos libera hierro ferroso que bajo condiciones neutras se oxida químicamente y se transforma a hierro férrico que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa del proceso la velocidad de oxidación es baja en los dos mecanismos de generación ácida (directa e indirecta) y la formación de aguas ácidas por oxidación debida al aire y a las bacterias (fundamentalmente *Thiobacillus ferrooxidans*) se producen a un ritmo semejante. Por lo general, la alcalinidad disponible en el medio es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente.

**2ª etapa.** La acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y el pH desciende y predomina la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. En

la reacción se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico, y éste a su vez en contacto con el agua da lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas. En esta etapa disminuye la eficacia del mecanismo directo (oxidación por el aire) y aumenta mucho la del indirecto.

**3ª etapa.** Cuando el pH desciende por debajo de 3 en la proximidad de los granos de pirita (aproximadamente 4,5 en el agua), el ion férrico se ve afectada por las reacciones de oxidación-reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa varía la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación de hidróxido férrico. En resumen el *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido. En este momento se producen grandes cantidades de ácido y se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

El mecanismo más importante es el indirecto, ya que es el que se autocataliza (si se inhibe la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* la producción de ácido se reduce al menos en un 75%).

- Si el pH del agua sube por encima de 5, igualmente se inhibe la oxidación tanto química como bacteriana.
- Si el pH del agua desciende por debajo de 4,5 debe esperarse que todo el sulfuro de hierro termine oxidándose.
- Si el pH desciende por debajo de 2,5 se establece un equilibrio en el que la actividad bacteriana se estabiliza, ya que habrá alcanzado su óptimo de desarrollo (la velocidad de reacción se habrá incrementado entre 105 y 106 veces respecto al mecanismo directo).

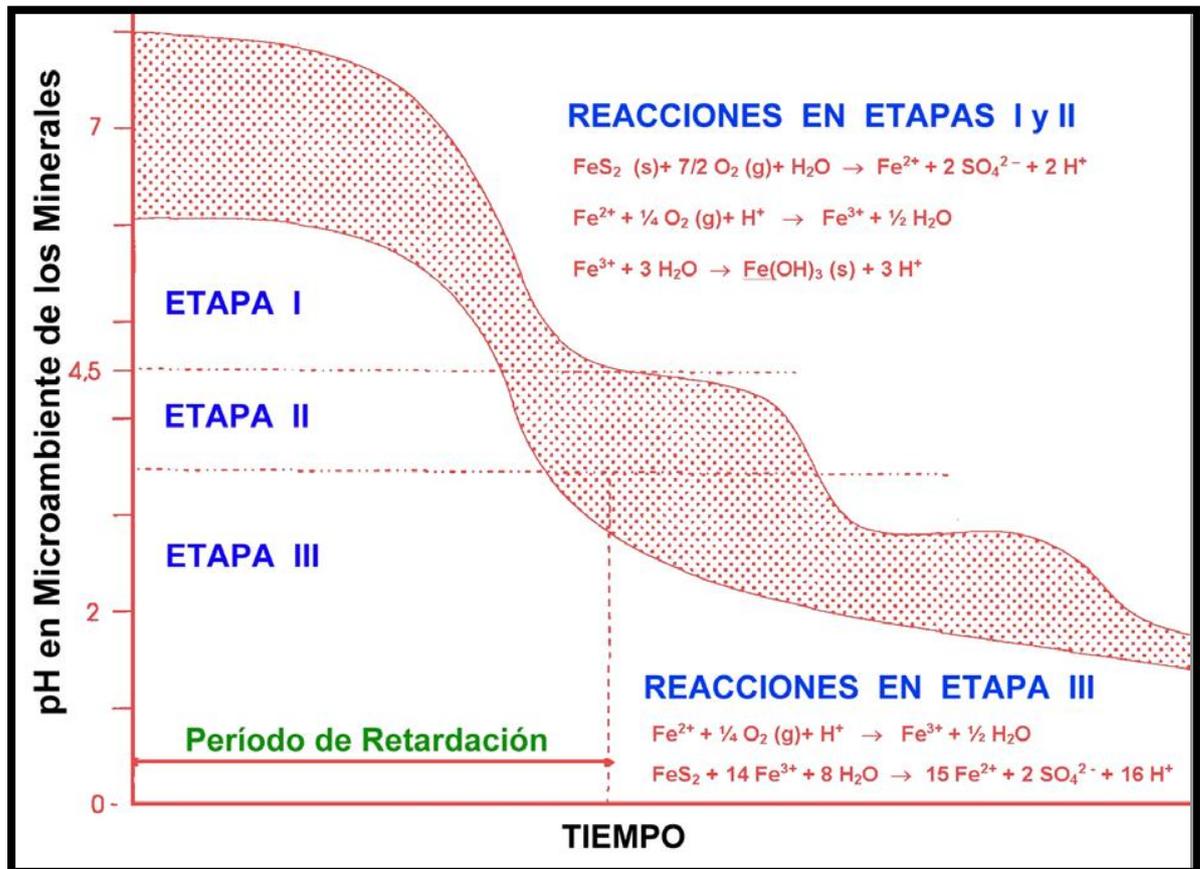


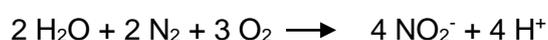
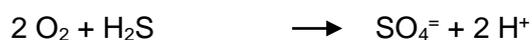
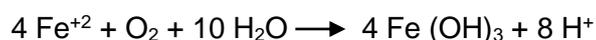
Figura N° 2. Esquema de la formación de aguas ácidas. (Rolandi, *et al*; 2003).

## 2.2.5. Zona aeróbica y anaeróbica en un pantano artificial (Humedal)

### 2.2.5.1 Zona aeróbica en un sistema Humedal

En las zonas aeróbicas las bacterias promueven la oxidación del hierro, manganeso y otros metales pesados hacia estados más insolubles generando la precipitación de dichos metales como hidróxidos y como consecuencia de estos remueven los contaminantes primarios presentes en el drenaje ácido de mina, adicionalmente, a través del mecanismo de adsorción estos precipitados también pueden remover cantidades significativas de elementos traza. (Homestake, *et al*; 1993).

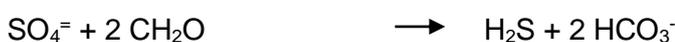
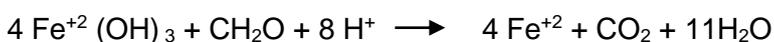
En la zona aeróbica las reacciones típicas vía acción microbiana son las siguientes:



Si la remoción de contaminantes involucra un proceso aeróbico, el Humedal deberá ser construido de tal forma que el agua permanece y circula sobre la superficie del sustrato. Las reacciones aeróbicas generan iones hidrógeno.

#### 2.2.5.2 Zona anaeróbica en un sistema humedal

En esta zona se remueven los componentes orgánicos, hierro, metales, amoníaco y sólidos en suspensión. En la zona anaeróbica las reacciones típicas a través de la acción microbiana son:



En las reacciones el componente  $\text{CH}_2\text{O}$  simboliza el material orgánico existente en el sustrato.

En la zona anaeróbica la remoción de los metales pesados y sulfatos es importante debido a que el material orgánico existente en el Humedal, estimula el desarrollo de la bacteria reductora de sulfatos, esta bacteria transforma el  $\text{SO}_4^-$  del drenaje ácido de mina en sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y en agentes nutritivos carbónicos y/o bicarbonatos. (Dvorak, 1992).

La generación de subsiguientes reacciones del  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NH}_3$  hacia el agua ácida de mina es fundamental en la remoción y/o precipitación de metales como sulfuros y al mismo tiempo aumentando el pH del medio. Es evidente que las reacciones anaeróbicas son aproximadamente el reverso de las reacciones aeróbicas, ambas zonas existen en un Humedal. (Hallberg, K, 2002).

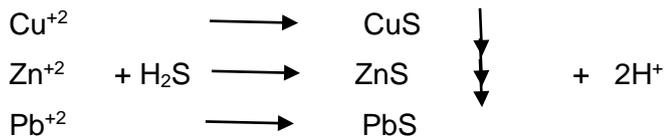
Si la remoción de contaminantes involucra a un proceso anaeróbico el Humedal deberá ser construido en forma tal que el flujo de agua ácida atraviese completamente el sustrato. La preponderancia de la zona anaeróbica en un Humedal es bien acentuada cuando en el proceso la remoción de contaminante se manifiesta por consumo de iones hidrógeno. (Homestake, *et al*; 1993).

### 2.2.6. Mecanismos de bacterias sulfato reductoras

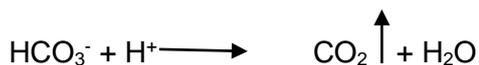
Este tipo de materia reduce el sulfato en el agua de mina, para producir sulfuro de hidrógeno y bicarbonatos.



El sulfuro de hidrógeno resultante (H<sub>2</sub>S) reacciona con los metales pesados en el agua de mina, produciéndose la precipitación de ellos como sulfuros:



A pesar de que la reacción antes descrita produce acidez, la reacción reductora de sulfato produce más alcalinidad (un mol en exceso sobre la acidez producida) y así prevalecen las condiciones alcalinas. (Homestake, *et al*; 1993).



Al elevarse el pH del efluente, algunos metales forman hidróxidos u óxido y precipitan.



Donde Me = metal.

Las variaciones de los contenidos de hierro en solución; se debe a movimientos del ion hierro en las botellas de biodegradación.



Finalmente, se estabiliza precipitando como carbonato de hierro.



### 2.2.7. Selección del área para la construcción de un pantano artificial

El lugar de construcción de un sistema humedal es frecuentemente determinado por la ubicación de las fuentes de agua ácida. El proceso de investigación del área incluye la selección del lugar; diseño de ingeniería temporal y permanente análisis

de los efectos ambientales, evaluación de la construcción, ajustes en el diseño de la obra y/o estructura, finalmente la verificación e inspección durante la construcción y operación del Humedal. (López, 2002)

La geología, geotecnia, hidrología y otros factores ambientales son considerados en el proceso de selección del área requerida. Durante la investigación y selección del área requerida se debe tener en cuenta lo siguiente. (Pérez, *et al*; 2008).

- ✓ Realizar un reconocimiento preliminar del área descubierta.
- ✓ Efectuar un estudio de campo con su correspondiente levantamiento de planos
- ✓ El área seleccionada debe tener limitada exploración sub-superficial, con clasificación de suelos del lugar y debe presentar datos históricos ambientales del área elegida
- ✓ Evaluar los potenciales efectos ambientales en el sector designado y tener en consideración las Normas legales vigentes en materia ambiental.

En la selección del área requerida se debe incluir los siguientes factores:

- ✓ Consideraciones en el uso de tierra.
- ✓ Estudios hidrológicos.
- ✓ Estudios geológicos.
- ✓ Consideraciones ambientales.

En la selección del área requerida por la construcción de un Humedal las consideraciones más importantes usualmente son: el uso de tierra y/o área designada y los accesos al Humedal. Los drenajes ácidos de mina a ser tratados deberían ser accesibles al área elegida para la construcción del Humedal y preferentemente que capten los flujos ácidos por gravedad. El lugar elegido debe ser accesible para la construcción y equipamiento del Humedal, para el tránsito del personal de operación y para el transporte de los substratos a utilizarse en el Humedal. (Johnson, 2002).

Para el tratamiento del drenaje ácido de mina los mínimos análisis de la calidad del agua para un estudio línea base y para la caracterización del drenaje ácido se debe incluir:

- ✓ pH
- ✓ Sólidos totales en suspensión.

- ✓ Oxígeno disuelto
- ✓ Concentración de  $\text{SO}_4^=$
- ✓ Concentración de metales pesados (As, Cu, Fe, Pb, Zn, Mn, etc.)

La caracterización de la hidrología e hidrogeología del agua subterránea debe incluir:

- ✓ Profundidad
- ✓ Calidad
- ✓ Estadística de crecidas de agua y/o ríos
- ✓ Potencial y existencia uso del agua subterránea.
- ✓ Pozo y/o manantial cercano.

Consideraciones geológicas para el proceso de selección del área requerida para la construcción del Humedal deben incluir:

- ✓ Materiales superficiales y caracterización del suelo
- ✓ Profundidad del lecho de roca
- ✓ Normas ambientales y consideraciones legales deben ser tomadas en cuenta durante la construcción de un humedal.

### **2.2.8. Diseño hidráulico de un pantano artificial**

La construcción del Humedal está ligada al diseño de reactores de adherencia y crecimiento bacteriano. Las concentraciones de los efluentes con contaminantes biodegradables disminuye, por consiguiente el tiempo de residencia hidráulico es un parámetro estratégico de diseño y control operacional. (Palomino, 1996).

En sistema Humedal de drenajes ácidos de mina el tipo de diseño básico es de flujo superficial. Un sistema de flujo superficial consiste en una o varias celdas donde el efluente ácido de mina es encaminado a profundidades bajas o poco profundas sobre una vegetación que suministra substratos. (Pérez, A, 2008).

El transporte de flujo ácido es controlado por las celdas de profundidad bajas a través de compuertas del uso de velocidad de bajo flujo y mediante la población de plantas acuáticas emergentes. La configuración de un sistema Humedal influye factores hidrobiológicos como: velocidad del agua, fluctuaciones, tiempo de resistencia, circulación y patrón de distribución, turbulencias y ondulación del agua. La configuración del Humedal debería aumentar la distribución de las aguas ácidas

de mina, minimizando el efecto de cortocircuito entre las celdas que contienen a diferentes tipos de sustratos. (Younger, 1998).

En el diseño de la configuración del sistema Humedal se debe considerar los siguientes factores:

- ✓ Grado de pre-tratamiento del agua acida.
- ✓ Requerimiento del área.
- ✓ La forma del terreno seleccionado.
- ✓ Pendiente adecuada.
- ✓ Necesidad de efectuar excavación.
- ✓ Tipos de sustratos.
- ✓ Compuertas internas de las celdas.
- ✓ Flexibilidad de la operación y mantenimiento del humedal.

### **2.2.9. Sustratos del pantano artificial**

Las interfaces sustrato – agua y sustrato – raíz son críticos en el desarrollo de mecanismos de tratamiento aeróbico – anaeróbico. El sustrato sustenta y/o apoya a la vegetación, suministra área superficial para la adherencia de microorganismos y está asociado con los mecanismos de tratamiento físico y químico. El sustrato va a influenciar en la capacidad de tratamiento porque afecta impresionantemente al tiempo de retención (contacto) y para el contacto superficial de microorganismos con las aguas residuales (aguas de desecho) y la disponibilidad de oxígeno. (Zhu, C, 2001)

La selección del sustrato se basa en el costo y en los requerimientos del tratamiento; los sustratos incluyen suelos naturales, mixtura de suelos y combinaciones. El tipo de sustrato tiene pequeña influencia sobre sólidos en suspensión, remoción orgánica y degradación biológica de organismos. Los sustratos van a influenciar en la remoción de algunos contaminantes a través de intercambio iónico y adsorción sobre sustancias húmicas. Suelos orgánicos y minerales gruesos tales como grava. Suelos orgánicos con alto contenido húmico fácilmente remueven iones metálicos a través de intercambio iónico. (Blancas.2011).

El sustrato orgánico estiércol, es suministrado a un sistema Humedal para proveer un lento desprendimiento de nutriente hacia las bacterias reductoras de sulfatos.

Los sustratos caliza y tierra húmica son adicionados al sistema Humedal para proveer un lento desprendimiento de nutriente hacia las bacterias reductoras de sulfatos. (Younger, P.L.1997).

Los sustratos, suelo y grava suministran lo siguiente:

- ✓ Considerable área superficial para la complejación de iones, aniones y otros compuestos.
- ✓ Superficies de adherencia por parte de la población microbiana.

Las condiciones de un sustrato orgánico son:

- ✓ Poseer una zona anaeróbica de tal forma que se genere el H<sub>2</sub>S
- ✓ Promover el crecimiento de las plantas
- ✓ Promover el crecimiento de las bacterias que aumentan el pH.
- ✓ Conducir el agua de drenaje ácido de mina a sitios de actividad bacteriana.
- ✓ Soporte físico para las plantas.

#### **2.2.10. Plantas acuáticas**

Las plantas acuáticas flotantes y/o sumergibles tienen la capacidad de extraer una amplia variedad de sustancias tóxicas contenidas en el agua. Las plantas acuáticas que se utilizan en un sistema biológico controlado representan un sistema de filtración muy eficaz para el tratamiento de materias tóxicas y aguas residuales de origen industrial y doméstico. (Steinhausler, F, 2001).

Las plantas normalmente utilizadas en los humedales construidos pertenecen al grupo de los hidrófitos emergentes, que son plantas acuáticas adaptadas a vivir parcialmente en el aire y parcialmente en el agua, presentando tallos y hojas aéreas y un sistema extendido de rizomas y raíces que suele permanecer sumergido. De entre el amplio rango de plantas acuáticas que pueden ser utilizadas en estos casos, las más comunes son las siguientes: *Phragmites australis* (carrizo), *Scirpus lacustris* (junco de laguna) y las diferentes variedades de *Typha* (*latifolia*, *glauca* o

augustifolia) (espadaña), que poseen, en general, buenas tolerancias específicas a determinados niveles y tipos de contaminantes. (J.Martelo, 2012).

En el desarrollo de un sistema humedal, el componente vegetativo es un factor muy importante. Las plantas acuáticas seleccionadas deberían tener las siguientes características:

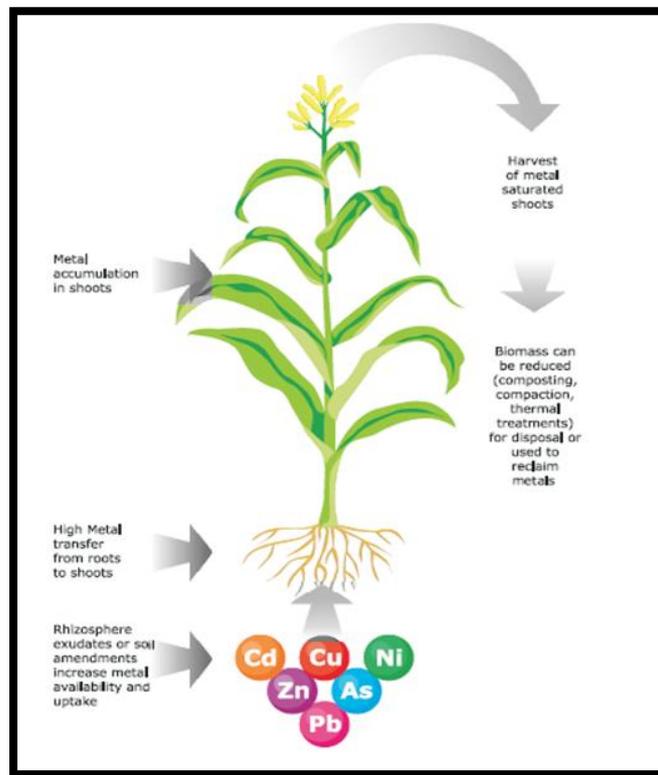
- ✓ Poseer activos colonizadores vegetativos con amplitud de sistemas de rizomas
- ✓ Tener considerable biomasa y tallos de alta densidad para obtener un máximo transporte de agua y asimilación de nutrientes.
- ✓ Ofrecer una máxima área superficial para la población microbiana
- ✓ Tener un eficiente transporte de oxígeno hacia la zona de la raíz anaeróbica para facilitar la oxidación de metales tóxicos reducidos y suministrar rizóforas en gran escala.
- ✓ Ser una combinación de especies que deberían suministrar una cubierta de gran envergadura sobre la amplitud de la profundidad del agua en las condiciones del terreno.

### **2.2.1 Mecanismos de adsorción de las plantas acuáticas**

En las plantas acuáticas al comienzo la mayoría de metales pesados se concentran en las raíces, con el tiempo pasan a los tallos y hojas, la capacidad de la biomasa de una planta acuática e adsorber metales pesados, presenta un comportamiento similar al sistema de un carbón activado la fitoextracción es una técnica la cual nos ayuda a conocer un poco más del mecanismo interno de las plantas y como beneficia al humedal. (Chaney, 1983).

La fitoextracción parece ser la técnica más prometedora y ha recibido una creciente atención a partir del momento en que las investigaciones fueron propuestas por Chaney (1983) como una tecnología para la recuperación de metales en los suelos contaminados.

Confía en el uso las plantas para extraer y traslocar metales a sus partes cosechables



**Figura N° 3. Mecanismo de adsorción de una planta acuática en un humedal.  
 (Chaney, 1983).**

El objetivo de la fitoextracción es reducir la concentración de metales en suelos contaminados, para regular los niveles de estos en el interior de la planta en un tiempo razonablemente marcado. Este proceso de extracción depende de la habilidad para seleccionar las plantas que crecen y acumulan metales bajo el clima y las condiciones específicas del suelo existentes en el lugar remediado. (Johnson, B, 2001).

Todas las plantas poseen un potencial para absorber una amplia variedad de metales del suelo pero la mayor parte de las plantas tienden solamente a absorber los que les son esenciales para su supervivencia y desarrollo. Existe una notable excepción de esta regla en un pequeño grupo de plantas que pueden tolerar, absorber y translocar altos niveles de ciertos metales, estas plantas reciben el nombre de "hiperacumuladoras" (Chen et al., 2001).

El concepto fue ampliado más adelante a otros elementos tales como cadmio, cobalto, cobre, plomo, selenio y zinc. Las plantas hiperacumuladoras generalmente tienen poca biomasa debido a que ellas utilizan más energía en los mecanismos necesarios para adaptarse a las altas concentraciones de metal en sus tejidos (Kabata- Pendias, 2000).

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Estas diferencias en la absorción de metales, pueden ser atribuidas precisamente a la capacidad de retención del metal en cuestión, por el suelo de cultivo y a la interacción planta-raíz-metal y al metabolismo vegetal propio (Vig et al., 2003).

De acuerdo con la estrategia de acumulación de Baker (1981), las plantas hiperacumuladoras pueden superar en 100 ó más veces los valores normales de metales acumulados. Estas plantas son especies muy tolerantes a uno o más metales pesados y a menudo su distribución está restringida a suelos ricos en un amplio rango de concentraciones de metales, pues no son competitivas en zonas no contaminadas. Una definición propone que si una planta contiene más de 0.1% de Ni, Co, Cu, Cr y Pb ó 1% de Zn en sus hojas sobre una base del peso seco, puede ser llamada "hiperacumuladora", independientemente de la concentración del metal en el suelo.(Hedin,1994).

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimenticia. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta. En las plantas, el concepto de bioacumulación se refiere a la agregación de contaminantes; siendo algunos de ellos más susceptibles a ser fito-disponibles que otros (Kabata-Pendias, 2000).

La hiperacumulación ha evolucionado en más de 400 especies de plantas repartidas en 45 familias botánicas, siendo la familia *Brassicaceae* una de las que cuenta con más géneros de este tipo; familia que se encuentra distribuida por todo el mundo, predominando en Nueva Caledonia, Cuba y la región Mediterránea, entre otros lugares (Baker et al., 2000).

Existen varias especificaciones de cómo se pueden adaptar las especies a la hiperacumulación, pero la más actual es su función en la protección de la planta contra el estrés biótico causado por patógenos y herbívoros. Esta propuesta es muy atractiva para explicar la razón de ser de las plantas hiper-acumuladoras y difiere de la defensa química natural existente en todas las plantas, basada en la síntesis de productos orgánicos procedentes del metabolismo secundario (Romero, A, 2003).

### **2.2.11. Procesos involucrados en los pantanos artificiales**

Un sistema Humedal reduce muchos contaminantes incluyendo la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) sólidos en suspensión (STS), nitrógeno, fósforo, metales pesados, componentes orgánicos y organismos patógenos. (Navarro, 2013).

Las reducciones son obtenidas por diferentes mecanismos:

- ✓ Oxidación de metales pesados vía acción bacteriana
- ✓ Reducción de sulfatos
- ✓ Desnitrificación.
- ✓ Reacciones de reducción y oxidación
- ✓ Proceso de adsorción e intercambio iónico.
- ✓ Asimilación de nutrientes e adsorción de metales por plantas.
- ✓ Filtración.
- ✓ Transformación biológica.

La zona de reducción es el sector donde participan activamente las bacterias reductoras de sulfatos (SRB) y las bacterias reductoras de metales pesados. (Shrihari, 1995)

- ✓ La zona de oxidación se efectúa a través del sector de plantas acuáticas, donde los vegetales y/o plantas actúan como filtros absorbiendo los metales pesados y al mismo tiempo reforzando al proceso de oxidación.
- ✓ La remoción de contaminantes se realiza por medio de la vegetación, suelos orgánicos y de microorganismos.

- ✓ La generación de condiciones anaeróbicas favorece la neutralización de la acidez del medio y de la remoción de los metales.
- ✓ La generación del H<sub>2</sub>S estimula la precipitación de metales finos y coloidales presentes en el agua ácida.
- ✓ El consumo de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>) favorece el aumento del pH.

### **2.2.12. Criterios para la construcción de un pantano artificial**

A continuación se describen algunos de los criterios que se deben considerar en la construcción de un pantano artificial. (García Petillo et al., 2008).

1. Proporcionar un suelo óptimo para las plantas hidrófilas (acuáticas), formado por materia orgánica descompuesta (turba) con cierto contenido de suelo mineral.
2. Evitar cortocircuitos del agua mediante la construcción de canales (es recomendable el diseño típico serpentin).
3. Colocar una cama de cuarzo para ayudar a que el sistema no se obstruya al momento de pasar de una celda a la siguiente.
4. Un humedal puede ser diseñado a través de un sistema aeróbico o de flujo superficial de agua a tratar o ser también diseñado en un sistema anaeróbico también denominado de flujo subterráneo o sub-superficial.
5. La permeabilidad del sustrato es una variable crítica en el diseño para tener buen éxito en la operación, pruebas experimentales a escalas de laboratorio y banco proporcionan una buena indicación de la permeabilidad del suelo a ser determinado para la construcción de un humedal.
6. Las plantas acuáticas tienen que ser adaptadas a sustratos anaeróbicos saturados en agua, evaluando plantas acuáticas emergentes, sumergibles y/o flotantes.
7. Las condiciones y procesos involucrados varían con la profundidad del diseño.
8. El diseño de un sistema Humedal debe concentrarse en formar precipitados inorgánicos y usar componentes orgánicos para promover su formación.
9. El diseño de un sistema Humedal puede incluir especies de plantas acuáticas que supervivan y produzcan largas cantidades de biomasa para

apoyar y/o sostener el crecimiento de los microorganismos en sistemas aeróbicos y anaeróbicos.

10. La configuración del sistema Humedal puede ser en múltiples celdas en serie, en paralelo y en ambas combinaciones.

11. Si hay posible problema de contaminación del agua subterránea, es preciso revestir el terreno del Humedal con arcilla.

### 2.3. Definición de términos básicos

- Humedal: También conocido como humedal en español es una zona cuya superficie está inundada con agua de forma permanente.(Aduvirre,2005).
- Hidrofilias: Es la propiedad física de las moléculas que tienen tendencia a interactuar con el agua o a disolverse.
- Remoción: Se utiliza para hacer referencia a todo aquel mecanismo que tenga ver con quitar algo de su lugar.(Ansola,2003).
- Solubilización: Es cuando un compuesto denominado soluto (ya sea sólido, líquido o gaseoso) se disuelve en otro (solvente), es decir, entre los dos pasan a formar una sola fase homogénea (se ve como si solo fuera un solo compuesto).
- Osmosis: Es cuando un compuesto denominado soluto (ya sea sólido, líquido o gaseoso) se disuelve en otro (solvente), es decir, entre los dos pasan a formar una sola fase homogénea (se ve como si solo fuera un solo compuesto).(Cohen,1995).
- Jalca: Es una región natural o eco región propia de los Andes peruanos, definida en su sentido más amplio como la serranía está a alturas de 3000 a 4200 msnm, no existen montañas nevadas en esta zona.
- Drenaje: Es un procedimiento médico o quirúrgico que consiste en recoger los fluidos o los gases producidos por el organismo y evacuarlos hacia el exterior o hacia el interior del cuerpo.(Hedin,1994).
- Lixiviación: Es el proceso de extraer desde un mineral una especie de interés por medio de reactivos que la disuelven o transforman en sales solubles.(Aduvirre,2000).
- Sulfuros: Los sulfuros son la combinación de azufre con oxidación -2 con otro elemento químico o con un radical. En la naturaleza este tipo de minerales se forman en las zonas pantanosas y se desprenden también en los gases de algunos volcanes.(Gusek,2000).

- Efluentes: Término empleado para nombrar a las aguas servidas con desechos sólidos, líquidos o gaseosos que son emitidos por viviendas y/o industrias, generalmente a los cursos de agua; o que se incorporan a estas por el escurrimiento de terrenos causado por las lluvias.(Montoya,2010).
- Caudal: Es volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados. Se refiere fundamentalmente al volumen hidráulico de la esorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma.(Mejia,2011).
- Yanahumus: Es el compostaje que se utiliza en Yanacocha que está conformado por los desperdicios de comida que se le aumenta tierra orgánica y bacterias que ayuden al proceso de descompostaje.
- ICP: También llamado Espectómetro de Plasma Inducido proporciona una rápida identificación y detección de contenido de trazas de metal en productos petrolíferos y químicos.(Scherenk,1998).

#### **2.4. Hipótesis**

El sistema de humedal en forma de serpentín nos ayudara a elevar el pH y disminuir la concentración de metales del agua ácida del depósito de desmonte unsuitable IV- Yanacocha Norte de modo que cumplan con los límites máximos permisibles que exige la legislación peruana.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Operacionalización de variables

Variable Dependiente: Calidad del efluente del depósito de desmonte unsuitable IV.

Variable Independiente: Tratamiento pasivo humedal.

Tabla N° 1. Variable Dependiente.

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Calidad del efluente del humedal	Es la pureza que tiene el agua antes, dentro y cuando sale del humedal.	Flujo	ml/min
		Concentración de metales	ppm
		pH	Unidad de pH

Tabla N° 2. Variable Independiente.

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Tratamiento pasivo humedal	Tratamiento de forma natural utilizando una área y combinando plantas y sustrato.	Flujo	ml/min
		Área	m <sup>2</sup>
		Tiempo de retención	Horas

### 3.2. Diseño de investigación

Tipo Experimental.

### 3.3. Unidad de estudio

Depósito de desmonte Unsuitable IV-Yanacocha Norte para un flujo de 25ml/min en un humedal artificial.

### 3.4. Población

El drenaje ácido del depósito de desmonte Unsuitable IV- Yanacocha Norte.

### 3.5. Muestra (muestreo o selección)

Se tomó una muestra puntual de la descarga número tres del depósito de desmonte Unsuitable IV- Yanacocha Norte para un volumen de 10 litros respectivamente.

### 3.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

La técnica utilizada en la recolección de datos fue la observación y caracterización del efluente mediante ICP para ver la carga metálica más abundante de los 3 puntos de descarga.

El instrumento utilizado en la recolección de datos fue tubos de ensayo de 200 ml.

#### Recolección de muestras

- Se recolectaron 10 L de agua ácida del punto de descarga.
- Se recolectaron 4 especies de plantas: Carrizo de jalca, hydrilla, junco de jalca y lirio de jalca.
- Se recolectaron 4 sacos de yanahumus cada uno pesaba 30 Kg.

#### Experimento N° 1: Prueba en Balde.

- Se utilizaron 3 baldes de 5L a los cuales se les agrego 2L de agua acida y 1Kg de yanahumus (compost).
- Luego de ello se colocaron 2 tipos de plantas en cada balde.
- Se dejaron las muestras por un periodo de 12 horas.

Las plantas que se utilizaron en el humedal son las que están adaptadas en la zona de Yanacocha y alrededores:

#### Berro de Agua (*Nasturtium officinale*)

- **Habitad:** Cajamarca, La encañada.
- **Características:**
  - Son hierbas anuales, bienales con pelos suberectos.
  - Hojas simples, por lo general oboladas o lanceoladas

- Flores pequeñas de color blanco, acumuladora de Zn, Cd y Pb.



Figura N° 4 Berro de Agua.

#### Lirio de Jalca (*Iris germánica*)

- **Habitad:** Partes altas de Cajamarca, Hualgayoc.
- **Características:** Pertenece a la familia de lirio pero este es una especie que no crece tan grande máximo llega a los 25 cm, acumula Mn, Zn y Fe.



Figura N° 5.Lirio de Jalca.

#### Totora (*Typha angustifolia*)

- **Habitad:** Zonas pantanosas Celendin, Cajamarca
- **Compuesto orgánico que degrada:** Fe, Cu, Pb.
- Puede crecer hasta 2 m de alto dependiendo de la clase de totora y el ambiente donde se encuentra.



**Figura N° 6.**Totora.

#### **Musgos de Agua (*Bryophyta sensu stricto*)**

- **Habitad:** Zonas en contacto con agua y pantanos
- Son plantas no vasculares se reproducen sexual o asexualmente.

- Ayudan a captar Fe y aumentar el pH de manera considerable y hacen el papel de un filtro natural



Figura N° 7. Musgos de Agua. Propio.

#### Carrizo de Jalca (*Phragmites australis*)

- **Habitad:** Zonas altas de Cajamarca y Hualgayoc
- Esta planta ayuda a concentrar Mg, Mn y Fe ya que tiende a ser más resistente a las demás plantas del sistema por tener su forma de su caña más resistente y las hojas.



Figura N° 8. Carrizo de Jalca. Propio.

### **Junco (*Scirpus holoschoenus*)**

- **Habitad:** Partes altas de Cajamarca y parte de Porcon.
- Metal que acumula: As.
- Esta planta florece en primavera ya verano.



**Figura N° 9. Junco. Propio.**

### **Hydrilla (*Hydrilla verticillata*)**

- **Habitad:** Pozas de contención del unsuitable IV.
- Un género monotípico de plantas acuáticas, es originaria del este de Europa.
- Acumula Hg, Cd, Cr, Pb.



**Figura N° 10. Hydrilla**

### 3.6.1. Experimento N° 2: Prueba en humedal

#### Calculo del área del humedal

En el diseño se tienen en cuenta el espesor de la lámina de agua, el tiempo de retención en el sistema, la composición del substrato y el área superficial o superficie de oxidación del humedal; también se consideran los aportes de agua al sistema (precipitaciones, escorrentías, etc.) y las descargas (infiltración, evapotranspiración, etc.). Además, el tipo de plantas se selecciona en función de las concentraciones y variedad de metales presentes en el influente.

Para el dimensionado de un humedal la principal variable a tener en cuenta es la carga metálica (q) que lleva el agua de mina a tratar, se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$Q \text{ (g/día)} = Q \text{ (l/min)} \times C_m \text{ (mg/l)} \times \left( \frac{1 \text{ g}}{10^3 \text{ mg}} \right) \left( \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ día}} \right) = 1,44 \times Q \times C_m$$

Donde:

q= Carga metálica

Q=Caudal de entrada

C<sub>m</sub>= Carga metálica de Fe y Mn

$$\text{Carga Fe} = 5 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 38.09 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times \left( \frac{1 \text{ g}}{10^3 \text{ mg}} \right) \left( \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ día}} \right) = 274.2 \text{ g Fe/día}$$

$$\text{Carga Mn} = 5 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 26.31 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times \left( \frac{1 \text{ g}}{10^3 \text{ mg}} \right) \left( \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ día}} \right) = 189.432 \text{ g Fe/día}$$

Para calcular la superficie nos basamos en la eliminación de hierro y el manganeso por m<sup>2</sup> al día. (Skousen et al., 1994; Hedin et al., 1994; Hyman *et al.*, 1995; Watzlaf, 1997).

Eliminación de hierro: 10 a 20 g/m<sup>2</sup>.día

Eliminación de manganeso: 0,5 a 1,0 g/m<sup>2</sup>.día

Finalmente una vez obtenidas las cargas metálicas, se divide entre la eliminación del hierro y del manganeso y se tiene la superficie del humedal. En nuestro caso:

$$\text{Superficie (m}^2\text{)} = (\text{g Fe/día}) / 10 \text{ a } 20 \text{ g/m}^2\text{.día} + (\text{g Mn/día}) / 0,5 \text{ a } 1,0 \text{ g/m}^2\text{.día}$$

Luego reemplazamos con los datos anteriores que obtuvimos de Fe y Mn.

$$\text{Superficie(m}^2\text{)} = \frac{274.2 \text{ g Fe/día}}{10 \text{ m}^2/\text{g/día}} + \frac{189.432 \text{ g Mn/día}}{0.5 \text{ m}^2/\text{g/día}} = 406.284 \text{ m}^2$$

Las dimensiones del humedal fueron de 165 cm de largo por 147 cm de ancho y altura de 30cm, estas medidas se calcularon de acuerdo a la carga metálica que entra al humedal que da por resultado un área de 2.42 m<sup>2</sup> que a la vez está dividida en 4 celdas de cada una de 0.60 m<sup>2</sup> respectivamente. El sustrato fue el yanahumus sobre el que se sembraron las plantas, las cuales estuvieron 15 cm arriba de la superficie del humedal.

El humedal está dividido en 4 celdas igual para los 3 humedales construidos.

Tienen orificios para que se le coloquen codos que nos ayudaran que el agua acida pase de un serpentín al siguiente serpentín, dentro de cada humedal se tiene mallas que nos ayudaran a que el sistema no se sature.

La entrada del agua ácida hacia el humedal es por la parte inferior y la salida es por la parte superior para que la eficiencia del humedal no disminuya. Finalmente, Para la construcción del humedal se utilizó material acrílico para que no se vea afectado por la temperatura y el cambio climáticos de la zona.



**Figura N° 11. Construcción del humedal a nivel de laboratorio.**

- **Cálculo del tiempo de retención.**

Para calcular el tiempo de retención hidráulico fue necesario emplear la ecuación de eficiencia, considerando que el humedal presentara una eficiencia del 80%. La Ecuación corresponde a la expresión utilizada para el cálculo de la eficiencia del humedal. (Meléndez, G. & Molina, E.2001)

$$E = 100 \times \left(1 - \frac{SK}{TRHm}\right)$$

Para medio en humus.

E= Eficiencia.

SK= 0.5 (constante de porosidad del suelo).

m=0.55

Despejando TRH en la ecuación 1, entonces:

$$TRHm = \frac{-100SK}{E - 100}$$

Reemplazando en la ecuación los valores de SK y m:

$$TRHm = \frac{-100 \times 0.5}{80 - 100} = \frac{-50}{-20} = 2.5$$

Luego:

$$TRH = (2.5)^{\frac{1}{0.55}} = (2.5)^{0.55}$$

Donde TRH=4.31 horas

### Adaptación de los humedales a la zona

En esta etapa los 3 humedales fueron colocados fuera del laboratorio en una zona adecuada donde estuvieron en contacto con los cambios de temperatura, efectos climatológicos para que así se adecue a las condiciones normales de la zona.



Figura N° 12. Adaptación del humedal a la zona

- **Disposición de materiales**

En primer lugar colocamos una capa de cuarzo de diámetro 2cm aproximadamente para evitar saturaciones en un futuro (Figura n°13). Luego colocamos el Yanahumus sobre las 4 celdas a una altura de 20 cm.

Seguido de eso colocamos las plantas en un orden altercado de cada especie diferente de tres filas y dos columnas con un espacio de planta en planta de 3 cm aproximadamente.



**Figura N° 13. Colocación de las plantas en el humedal.**

Luego de tener todo armado procedemos a conectar el humedal con el tanque que alimenta agua acida mediante una manguera con una llave de paso a la mitad para poder hacer el monitoreo de flujo diariamente también el tanque se llena cuando está por debajo de la mitad para que así no haya problemas en la toma de datos, posteriormente adaptamos una bomba a un tanque de mayor capacidad de 1600 l.

- **Procesamiento de la Información**

Los datos se tomaron desde la primera salida del flujo de agua. Estas muestras fueron enviadas al laboratorio de Minera Yanacocha para ser analizadas en ICP 34 y peachímetro Hanna 235. Las muestras fueron analizadas cada 4 días durante un periodo de 2 meses para cada flujo.

- **Análisis estadístico.**

Todos los datos fueron analizados usando el software Minitab versión 18. Para verificar que la data sea distribuida normalmente se utilizó la gráfica de probabilidad de Anderson Darling, donde el valor de significancia de  $p$  es mayor a 0.05.

En el caso donde la distribución no fue normal, se utilizó eliminación de picos.

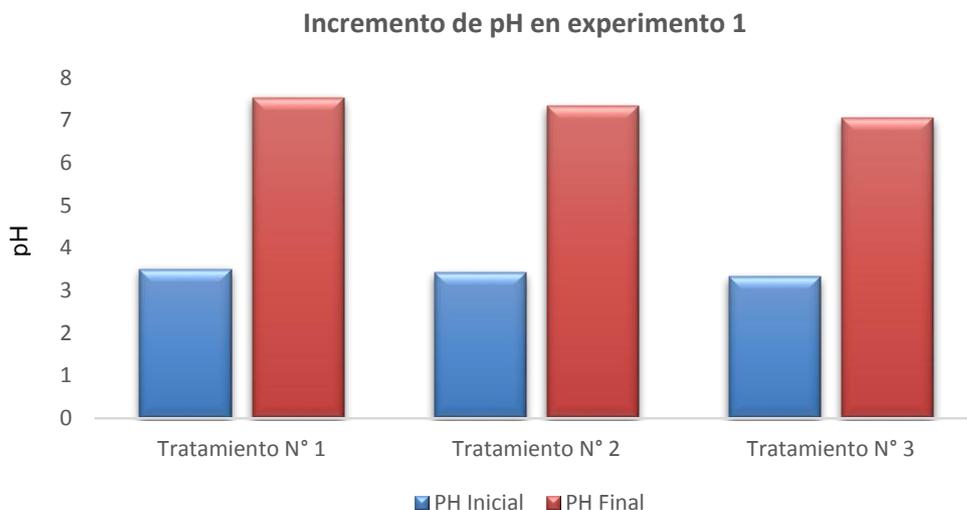
El aumento de pH y la disminución de metales presentes en el humedal con los tres flujos diferentes que utilizamos fueron testeadas empleando un análisis de varianza (Anova One Way) los resultados fueron reportados para un valor  $P < 0.05$ .

Finalmente las medias fueron comparadas usando el test de significancia LSD Fisher ( $P < 0.05$ ).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados de pH primer experimento.

El primer experimento se desarrolló en tres pruebas de balde donde se mezcló Yanahumus y las especies vegetales. El pH inicial en los tres tratamientos fue de 3.4 y el pH final en los tres tratamientos fue de 7.3 respectivamente, por lo cual se pasó a la siguiente etapa.



**Figura N° 14. pH inicial y final primer experimento**

En la figura N°14, se puede observar que existen diferencias notables entre los valores de pH inicial y final. Con estos resultados se sostuvo que las plantas conjuntamente con el yanahumus pueden mejorar la calidad del efluente con lo que respecta a pH.

Los valores normales de un pH adecuado para descargas de agua tipo 3 están en un rango de 6.5 a 9.0 (MINAM, 2010). De acuerdo a ello podemos observar que los tres tratamientos cumplen con la legislación ambiental en términos de pH. Con estos resultados se procedió a diseñar el sistema pasivo en forma de serpentín.

Cabe resaltar que no es lo mismo hacer una prueba en baldes que no tiene un flujo continuo y solo está estancado que hacer una prueba con un control de flujo y con un sistema continuo, pero fue la prueba que nos ayudó a continuar con la investigación.

#### 4.2. Variación de pH en función a los caudales.

Se utilizaron tres caudales de 25,30 y 35 ml/min. Con el caudal de 25 y 30 ml/min se logró un incremento de pH de 3 a 7 y con el caudal de 35ml/Min se logró un incremento de pH de 3 a 6.7.

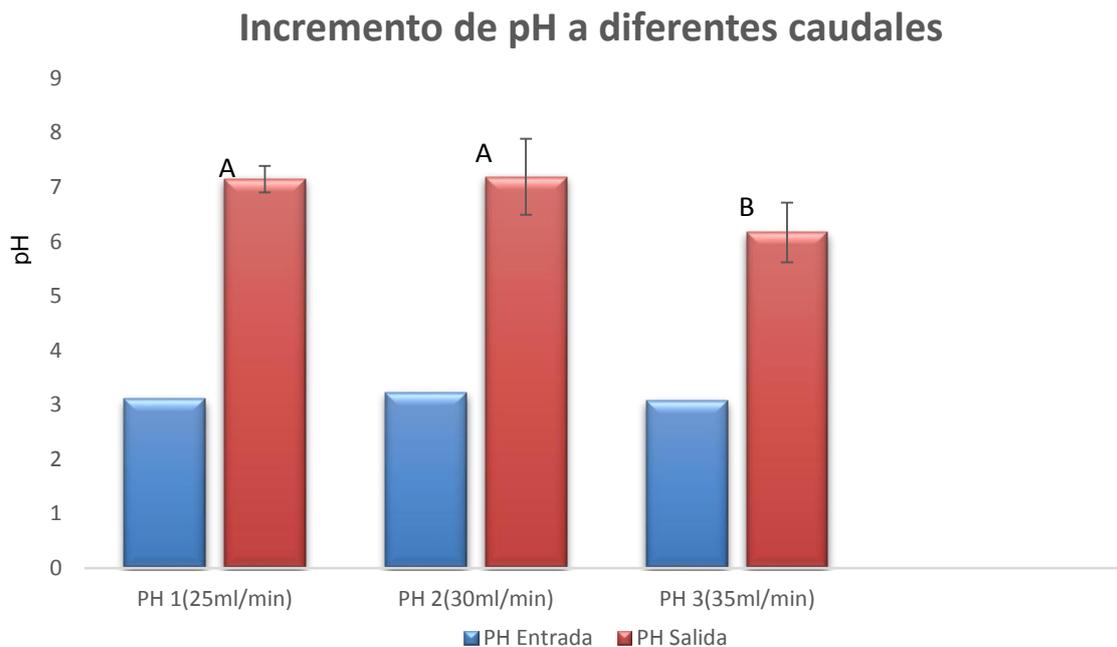


Figura N° 15. pH de ingreso y salida del humedal

Tabla N° 3. Análisis de varianza del pH

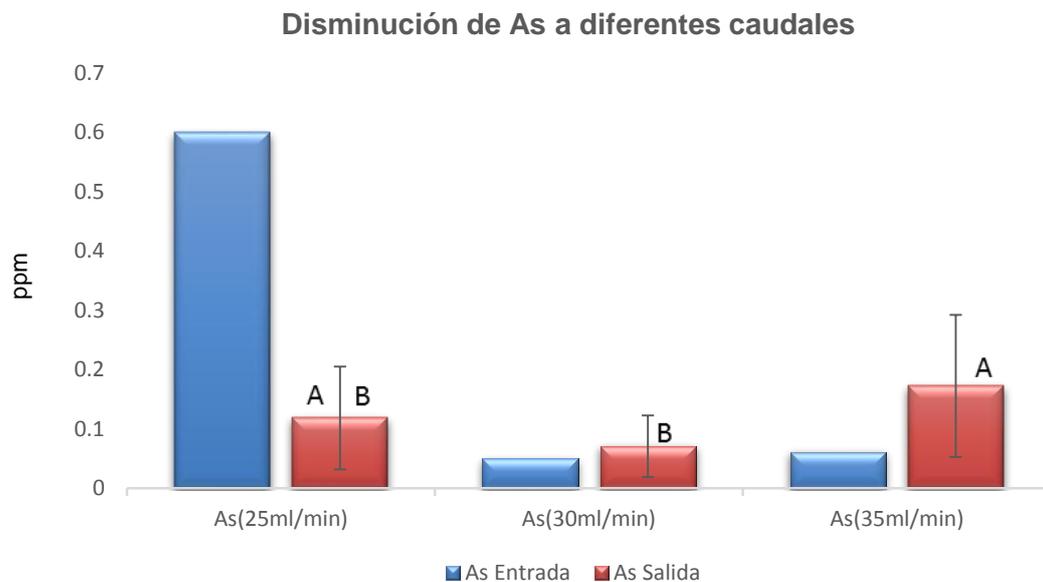
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Muestra	2	9.367	4.6833	15.32	0
Error	39	11.919	0.3056		
Total	41	21.286			

De la Figura N°15 se puede observar que no existen diferencias significativas entre los valores de pH que se presentan en los flujos de 25 y 30 ml/min durante los 2 meses de descargas del efluente. Sin embargo, si existen diferencias con el flujo de 35ml/min que logró un incremento de 6.5. Aún con estos resultados, se cumple con los LMP.

### 4.3. Disminución de metales por caudal.

#### 4.3.1. Resultados de la disminución de Arsénico en el humedal.

Los valores de Arsénico variaron de acuerdo a cada flujo en los humedales. Para el flujo de 25 ml/min los resultados variaron de 0.6 a  $0.11 \pm 0.08$ , para el flujo de 30 ml/min varió de 0.05 a  $0.07 \pm 0.051$  y el flujo de 35 ml/min los resultados variaron de 0.061 a  $0.17 \pm 0.11$ ).



**Figura N° 16. Concentración de As en tres flujos diferentes.**

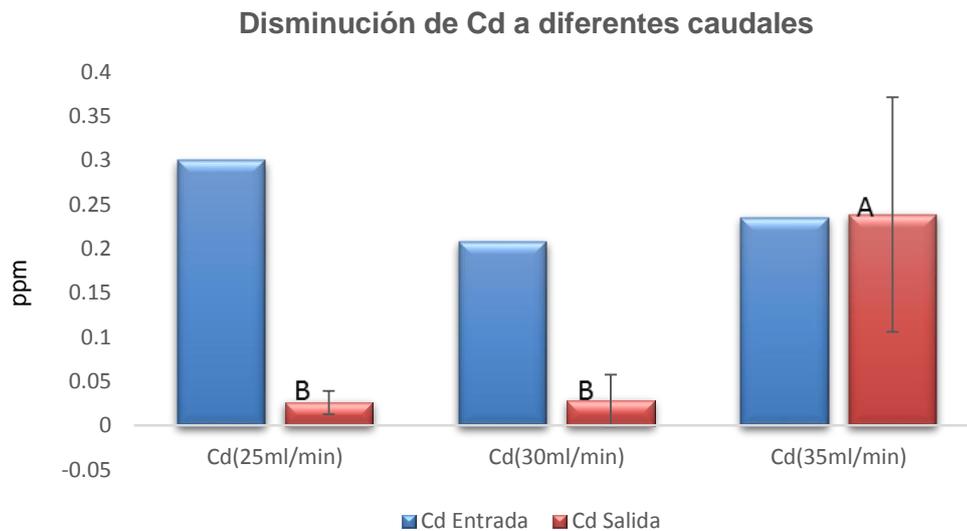
**Tabla N° 4. Análisis de varianza de arsénico**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>C1</b>	2	0.07211	0.036053	4.09	0.024
<b>Error</b>	39	0.34382	0.008816		
<b>Total</b>	41	0.41592			

En la Figura N°16 se puede observar que existen diferencias significativas entre los valores de arsénico en los flujos de 30 y 35 ml/min. Como podemos apreciar el flujo de 30 ml/min es el que cuenta con una disminución mayor de arsénico presente en el humedal, mientras que la concentración del arsénico en el flujo de 35 ml/min no tuvo los resultados esperados.

#### 4.3.2. Resultados de la disminución de Cadmio en el humedal.

Los valores de Cadmio variaron de acuerdo al flujo. En el caudal de 25 ml/min los resultados variaron de 0.3 a  $0.026 \pm 0.013$ , para el de 30 ml/min los resultados variaron de 0.2 a  $0.028 \pm 0.029$  y finalmente el flujo de 35ml/min los resultados variaron de 0.235 a  $0.239 \pm 0.133$ .



**Figura N° 17. Concentración de Cd en tres flujos diferentes**

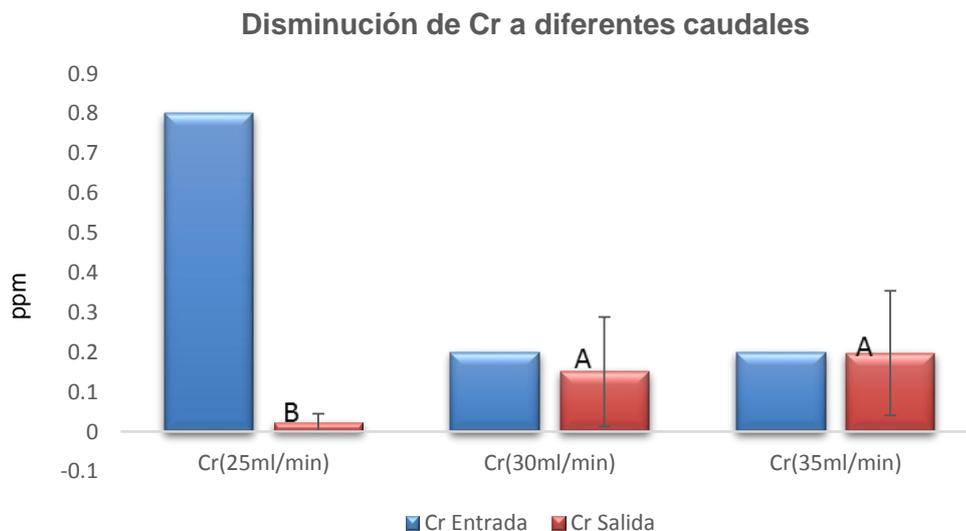
**Tabla N° 5. Análisis de varianza de cadmio**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>C1</b>	2	0.418	0.208982	31.15	0
<b>Error</b>	39	0.2616	0.006708		
<b>Total</b>	41	0.6796			

De la Figura N°17 se puede observar que existen diferencias significativas entre los valores de cadmio en el flujo de 35ml/min respecto al de 25 y 30 ml/min, mientras que para los flujos de 25 y 30 ml/min, no varió significativamente.

#### 4.3.3. Resultados de la disminución de Cromo en el humedal.

Los valores de Cromo variaron de acuerdo al flujo, para el flujo de 25 ml/min los resultados variaron de 0.8 a  $0.022 \pm 0.023$ ), para el de 30 ml/min los resultados variaron de 0.2 a  $0.151 \pm 0.138$ ) y finalmente el flujo de 35ml/min los resultados variaron de 0.2 a  $0.198 \pm 0.157$ ).



**Figura N° 18. Concentración de Cr en tres flujos diferentes.**

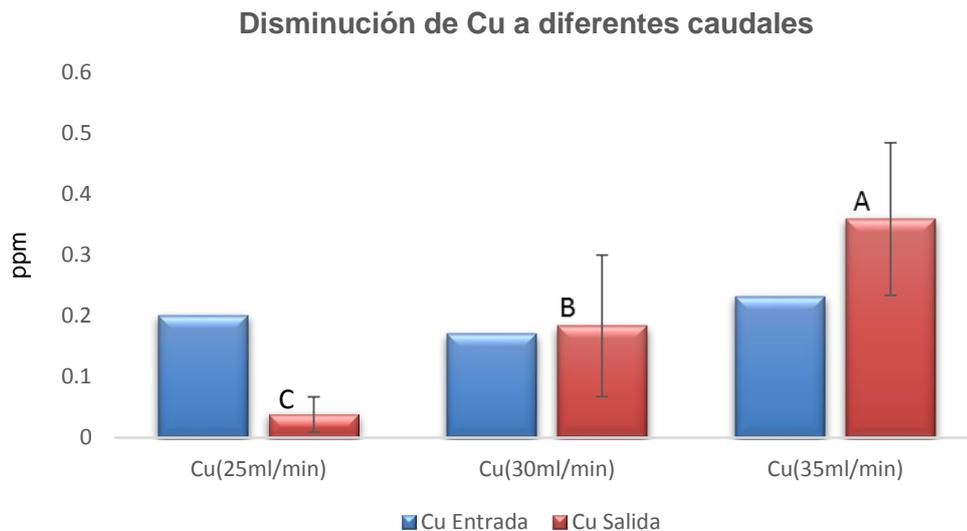
**Tabla N° 6. Análisis de varianza de cromo**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>C1</b>	2	0.2314	0.11569	7.31	0.002
<b>Error</b>	39	0.6171	0.01582		
<b>Total</b>	41	0.8485			

De la Figura N°18 se puede observar que el caudal con el que se observa mayor disminución de cromo es el de 25 ml/min. Los flujos de 30 y 35 ml/min no presentan diferencias significativas entre los mismos. Cabe indicar que el flujo de 25ml/min es el único que cumple con los LMP.

#### 4.3.4. Resultados de la disminución de Cobre en el humedal.

Los valores de Cobre variaron de acuerdo al flujo, para el flujo de 25 ml/min los resultados variaron de 0.2 a  $0.038 \pm 0.029$ , para el de 30 ml/min los resultados variaron de 0.17 a  $0.184 \pm 0.116$  y finalmente el flujo de 35ml/min los resultados variaron de 0.23 a  $0.359 \pm 0.125$ .



**Figura N° 19. Concentración de Cu en tres flujos diferentes.**

**Tabla N° 7. Análisis de varianza de cobre.**

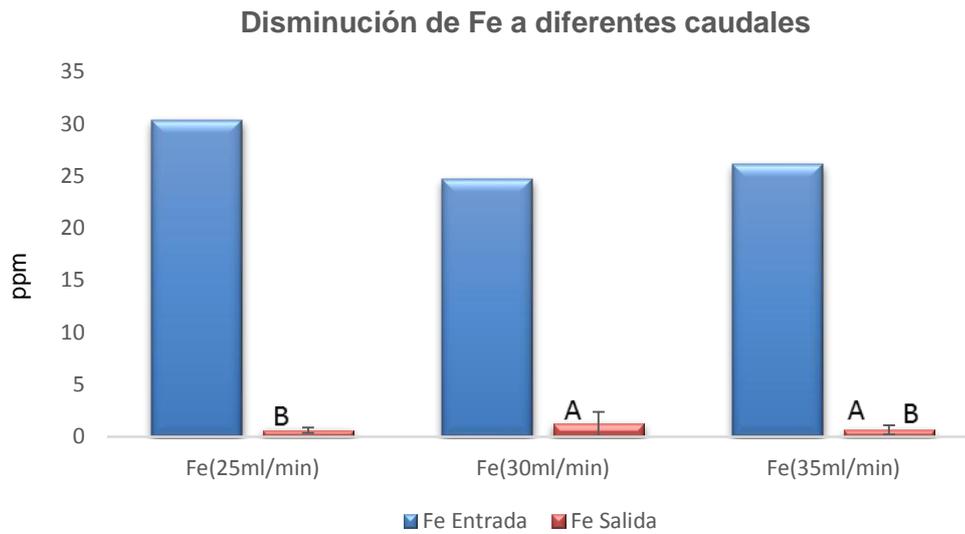
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>C1</b>	2	0.724	0.362	33.51	0
<b>Error</b>	39	0.4214	0.0108		
<b>Total</b>	41	1.1454			

De la Figura N°19 se puede observar que existen diferencias significativas entre los valores de cobre en los tres flujos diferentes aplicados al sistema pasivo.

Como podemos apreciar el flujo de 25 ml/min es el que cuenta con una disminución mayor de cobre presente en el humedal, mientras que la concentración del cobre en el flujo de 30 y 35 ml/min es mucho mayor. Cabe indicar que el cobre tanto de ingreso como de salida cumple con los LMP (0.5 ppm).

#### 4.3.5. Resultados de la disminución de Hierro en el humedal.

Los valores de Hierro variaron de acuerdo al flujo. Para el flujo de 25 ml/min los resultados variaron de 30.3 a  $0.637 \pm 0.2$ ), para el de 30 ml/min los resultados variaron de 24.6 a  $1.234 \pm 1.157$ ) y finalmente el flujo de 35ml/min los resultados variaron de 26.09 a  $0.659 \pm 0.431$ .



**Figura N° 20. Concentración de Fe en tres flujos diferentes.**

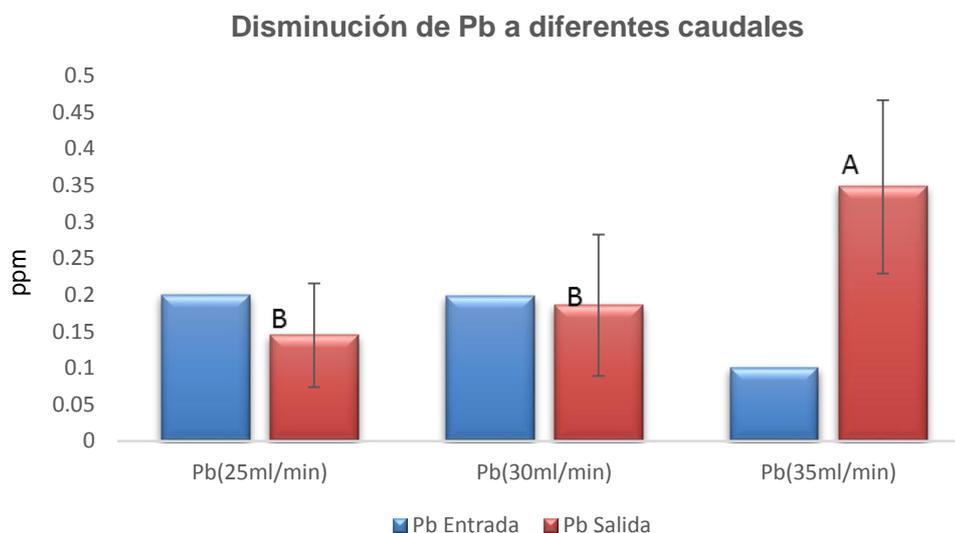
**Tabla N° 8. Análisis de varianza de Hierro**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>C1</b>	2	3.207	1.6037	2.81	0.073
<b>Error</b>	39	22.285	0.5714		
<b>Total</b>	41	25.493			

De la Figura N°20 se puede observar que existen diferencias significativas en los flujos de 25 y 30 ml. Sin embargo. Como podemos apreciar el flujo de 25 y 35 ml/min son los que cuenta con una disminución mayor de hierro presente en el humedal. Cabe resaltar que en los tres flujos el hierro cumple con los LMP.

#### 4.3.6. Resultados de la disminución de Plomo en el humedal.

Para el flujo de 25 ml/min los resultados variaron de 0.2 a  $0.145 \pm 0.14$ , para el de 30 ml/min los resultados variaron de 0.19 a  $0.186 \pm 0.09$  y finalmente el flujo de 35ml/min los resultados variaron de 0.1 a  $0.348 \pm 0.11$ .



**Figura N° 21. Concentración de Pb en tres flujos diferentes.**

**Tabla N° 9. Análisis de varianza de plomo.**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>C1</b>	2	0.3227	0.16135	15.77	0
<b>Error</b>	39	0.3989	0.01023		
<b>Total</b>	41	0.7216			

De la Figura N°21 se puede observar que los mejores tratamientos fueron los flujos de 25 y 30 ml/min. Estos no mostraron diferencias significativas entre los mismos, pero si con respecto al flujo de 35ml/min.

El plomo juega un papel importante en las plantas, este en pocas cantidades o déficit ocasiona un aumento de rigidez en las paredes de sus tejidos en las plantas mientras que en cantidades altas puede ocasionar inhibición de la respiración y la fotosíntesis (Kabata, 2000); en el caso de nuestra investigación, las plantas que están presentes en el humedal en estos niveles de plomo se desarrollaron normalmente.

#### 4.3.7. Resultados de la disminución de Mercurio en el humedal.

Los valores de Mercurio variaron de acuerdo al flujo. El flujo de 25 ml/min tuvo una variación de 0.12 a  $0.026 \pm 0.03$ , para el de 30 ml/min tuvo una variación de 0.043 a  $0.189 \pm 0.17$  y finalmente el flujo de 35ml/min tuvo una variación de 0.15 a  $0.36 \pm 0.19$ .

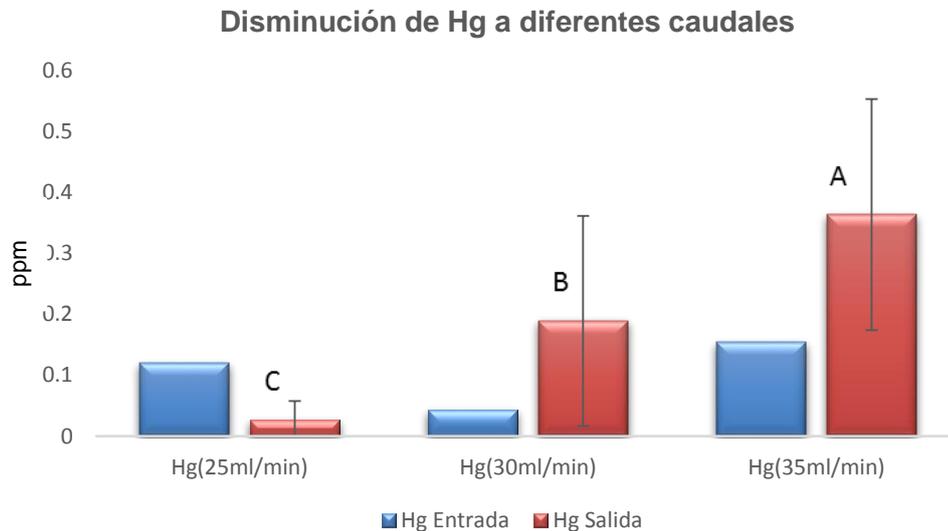


Figura N° 22 Concentración de Hg en tres flujos diferentes.

Tabla N° 10. Análisis de varianza de mercurio

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>C1</b>	2	0.7993	0.39967	16.66	0
<b>Error</b>	39	0.9355	0.02399		
<b>Total</b>	41	1.7348			

De la Figura N°22 se puede observar que existen diferencias significativas entre los valores de cobre en los tres flujos diferentes aplicados al sistema pasivo.

Como podemos apreciar el flujo de 25 ml/min es el que cuenta con una disminución mayor de mercurio presente en el humedal, mientras que la concentración del mercurio en el flujo de 30 y 35 ml/min disminuyó en menor cantidad.

Estudios muestran que la tecnología más usada en minimización de mercurio es la utilización de las membranas semipermeables artesanales (método activo) utilizadas en conjunto con los métodos pasivos (Montoya et al., 2010).

#### 4.3.8. Resultados de la disminución de Zinc en el humedal.

Los valores de Zinc variaron de acuerdo al flujo. Para el flujo de 25 ml/min los resultados variaron de 0.93 a  $0.136 \pm 0.11$ , para el de 30 ml/min los resultados variaron de 1.37 a  $0.315 \pm 0.2$  y finalmente el flujo de 35 ml/min los resultados variaron de 0.81 a  $0.343 \pm 0.16$ .

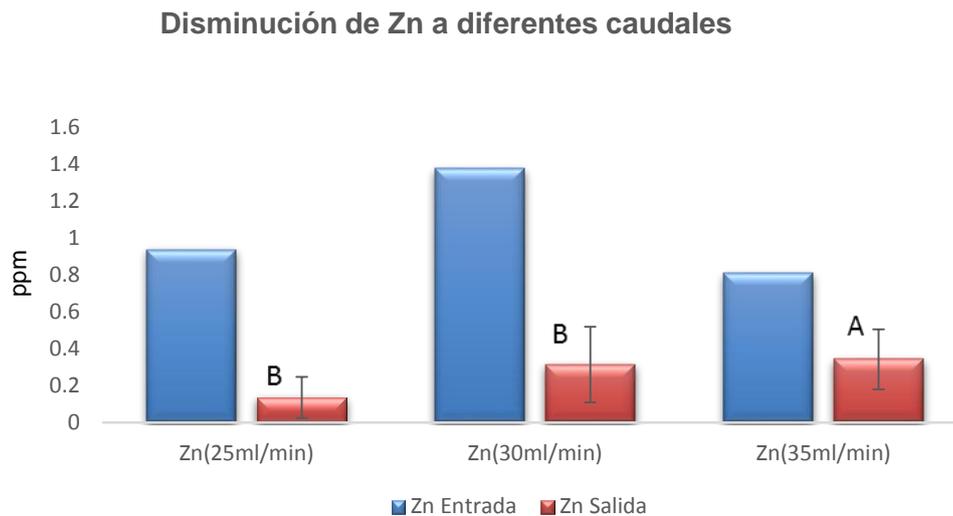


Figura N° 23. Concentración de Zn en tres flujos diferentes.

Tabla N° 11. Análisis de varianza de zinc

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
C1	2	0.3537	0.17684	6.08	0.005
Error	39	1.135	0.0291		
Total	41	1.4886			

De la Figura N°23 se puede observar que no existen diferencias significativas entre los valores de cobre de los flujos de 25 y 30 ml/min pero si con respecto al de 35 ml/min.

## CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Incremento del pH en experimento 1.

En el primer experimento pudimos obtener resultados positivos en el incremento de pH que incluso logrón cumplir con los LMP. Estos resultados fueron bastante alentadores ya que la mayoría de humedales diseñados, siempre han utilizado carbonato de calcio o alguna otra fuente derivada del mismo para el incremento de pH. Esto generalmente es una desventaja en los sistemas humedales debido a que una vez que se consume la caliza o el carbonato de calcio, el sistema no puede producir acidez y las especies empiezan a perecer. De la información bibliográfica, pudimos observar que los investigadores de la Universidad Nacional de Ingeniería (Blancas, 2001) realizaron pruebas utilizando compost para incrementar el pH, sin embargo sus resultados no incrementaron el pH como los nuestros. Esto quiere decir que algún componente del Yanahumus probablemente realiza el incremento del pH.

En COMARSA a diferencia de nuestra investigación, se utilizó estiércol de varios animales y los mezclaron con agua acida dentro de botellas y lo tuvieron en agitación por un periodo de 12 horas pero nunca incrementaron especies vegetales al sistema. Por otro lado, la mayoría de sistemas de humedales naturales presentan resultados importantes tratando aguas residuales domésticas, en el caso de aguas ácidas de la mina son potencialmente mayores sin embargo el proceso del diseño casi es igual y la fase de experimentación ya sea en sistema continuo o estancado es uno de los primeros pasos que deben de seguirse (Witthar, 1993).

Lo más importante para poder determinar el siguiente paso en el diseño de un humedal, es una primera fase en la cual se puedan caracterizar los materiales y sustratos a utilizar, en nuestro caso, nuestra primera fase evaluó los incrementos de pH con un recurso que ha sido producido dentro de la misma empresa minera y que tiene según nuestros resultados propiedades neutralizantes por la gran cantidad de materia orgánica que tiene. En general, el proceso de caracterización es más complicado debido a determinados problemas que se presentan, por ello la mayoría de autores (Campbell, 1999), (Witthar, 1993) señalan que lo más importante son las primeras fases de caracterización y las consideraciones del diseño desarrolladas. Algunas de ellas se pueden mencionar como: (1) crear condiciones biológicas para asegurar el pH adecuado, (2) agregar macronutrientes, (3) la vegetación apropiada selecta y (4) conseguir ayuda de los expertos implicados en el campo de la ecología y de la toxicología.

## 5.2. Resultados de pH en los humedales.

En el presente trabajo se presenta un proyecto piloto experimental, el cual se desarrolló en el laboratorio de metalurgia de Yanacocha lugar La Quinoa las dimensiones del humedal fueron 1.20m de ancho ,1.85m de largo y 0.80m de altura, estas dimensiones fueron tomadas en consideración a los cálculos de la carga metálica del hierro y el manganeso. Se toma como referencia a estos dos metales, ya que el hierro es uno de los más abundantes en las aguas ácidas de mina y el manganeso que es el elemento que más tarda en precipitar y que lo hace a pH bastante altos (11).

El humedal se construyó a base de material acrílico ya que así los cálculos de área y la cantidad de sustrato que vamos a necesitar es más exacto, los pasantes de cada celda se hicieron en la parte superior de la terminación de cada celda para que la celda tuviera un mayor contacto con las plantas, agua ácida y el sustrato.

El sustrato llamado “YANAHUMUS”, fue el sustrato que aportó a la neutralización del agua ácida. Este sustrato es elaborado en las instalaciones de Yanacocha y es el producto del compostaje de residuos orgánicos que se obtienen e los comedores de la empresa. Estos residuos orgánicos son tratados a través de microorganismos eficaces y al cabo de 1 mes se han convertido en Yanahumus. La gran cantidad de materia orgánica presente en este compost puede ser capaz de adsorber o absorber metales pesados y probablemente incrementar el pH con ayuda de las especies vegetales.

La vegetación desempeña un papel importante en el tratamiento de DAM, especialmente en el estímulo de procesos microbianos del retiro del metal. La selección de plantas es una importante etapa para alcanzar un tratamiento acertado. Sin embargo, poco trabajo existe en la selección apropiada de la especie de planta para los humedales, todo esto puede tener implicaciones importantes para el éxito a largo plazo de un proyecto. Puesto que el DAM es altamente ácido y contiene altas cantidades de metales, las plantas tienen que ser seleccionadas considerando su capacidad de resistir estas condiciones. Además, la selección de la vegetación se debe hacer basándose en el conocimiento de condiciones locales, y su capacidad de proporcionar las funciones requeridas, por ello nosotros utilizamos especies que se encontraban alrededor de la zona de trabajo.

Las plantas que se utilizó en el humedal fueron seleccionadas de una manera particular ya que investigando logramos encontrar un pantano dentro de la operación que nos facilitó extraer las plantas que estaban en contacto con agua ácida y sería más fácil incluirlas en el humedal ya que están climatizadas a la zona y más que todo cumplen con el propósito de ayudar a disminuir la carga metálica del humedal.

Por otro lado no se pudo encontrar totora (*Typha angustifolia*), la cual se tuvo que traer de Celendín, esta planta nos ayudó principalmente a la reducción de Fe y los resultados fueron satisfactorios. Diferentes estudios utilizaron estas plantas en humedales construidos, por ejemplo investigadores de la UNI fueron en la quebrada de Tucush y recolectaron dichas especies para que traten aguas de un botadero de mina. A diferencia de este proyecto que es en forma de serpentin en esa investigación utilizaron pozas, las cuales estaban alineadas como celdas pero solo al final sembraron las plantas y lo demás servía como sedimentadores. (Kadlec et al., 2000; Skousen et al., 1994; Witthar, 1993;).

El typha es fácil de propagar, producir biomasa grande, y puede crecer en aguas con concentraciones del hierro de hasta 100 mg/l. Existe en la mayoría de los sistemas de humedales subterráneos con densidades de la planta de 0,5 a 1,0 por pie cuadrado en la mayoría de los humedales (Witthar, 1993). Esta versatilidad y resistencia, junto con su capacidad de fijar el hierro y el manganeso por adsorción, le hacen una excelente opción vegetativa para remediar el drenaje de ácido de mina del humedal construido.

Los estudios en la especie Sphagnum muestran influencia significativa en eliminación de los metales y el aumento del pH (Witthar, 1993). Sin embargo, Sphagnum es difícil de establecer y mantener (Kadlec et al., 2000) y "es susceptible a la acumulación de hierro tóxico, y a cambios en acidez, carga de sedimentos, clima, química del agua, profundidad, y flujos " (Witthar, 1993). Este problema de establecimiento lo hace menos viable que el uso de la Thypha. Sin embargo, esto no imposibilita su consideración en la investigación de DAM. Descubrimientos posteriores y el desarrollo de técnicas podrían probar su eficacia en humedales construidos.

Por otra parte investigadores en la mina de Salamanca en España probaron experimentos en los cuales antes de que el flujo entre al humedal hicieron canales de aireación que servía para que el  $Fe^{+2}$  pueda pasar a  $Fe^{+3}$  lo cual no es el caso en nuestro proyecto por que el 98% de Fe esta en  $Fe^{+3}$ . Los resultados que se obtuvieron en estas minas fueron satisfactorios ya que utilizaron un diseño diferente al nuestro pero con los parámetros de construcción adecuados, en la quebrada de Tucush, Antamina su diseño solo se basó en la sedimentación de partículas que se desprendían del botadero C y al final colocaban las plantas para mejorar la calidad del agua pero solamente analizaron la remoción de amonio y nitrato mientras que en nuestra investigación analizamos más elementos que son perjudicial si se hace una descarga inadecuada al medio ambiente.

### 5.3. Resultados de metales en los humedales.

La caracterización del efluente se hizo al principio del experimento a través de un equipo de ICP en las instalaciones de minera Yanacocha. El fluente presentaba una alta carga metálica expresada en las imágenes presentadas en el capítulo de resultados.

Luego de la construcción del humedal y adecuarlo a que este expuesto al clima de la zona, controlamos el flujo y tomamos la primera muestra después de 65 horas que es lo que demora para que el flujo inicial haga su primera descarga en la parte final del 4to serpentín. Nuestro sistema pasivo nos ayudo a disminuir gran cantidad de carga metálica presente en el efluente como es Al, Fe, Cd, Cu, Cd, Pb, etc. Al final del experimento todos estos metales cumplieron con los límites máximos permisibles

#### Arsénico

El arsénico es uno de los metaloides más difíciles de minimizar no solo en los humedales sino también en los sistemas convencionales como son las plantas de tratamiento de aguas ácidas. Sin embargo, nuestros resultados muestran una reducción de arsénico que con un poco de aireación previa podría cumplir con la legislación ambiental solicitada. Estudios previos muestran que cualquier proceso de oxidación previa del arsénico antes de ingresar a un sistema pasivo o un sistema convencional mejorarían hasta en un 35% los resultados en precipitación de arsénico. (Lopetegui, 2015). Así mismo, existe información del uso de plantas como *Leimus cinereus* capaces de Fito estabilizar arsénico en los suelos, pero no se ha observado estos resultados de especies en humedales. (Sánchez, 2015).

#### Cadmio

Según los LMP el valor de la concentración de cadmio total (II) debe ser de 0.05 mg/L. En nuestro sistema de humedales con los flujos de 25 y 30 ml/min logramos cumplir con los límites máximos permisibles necesarios para una descarga al medio ambiente. El cadmio es un elemento que generalmente se encuentra asociado a procesos de meteorización y presente en partículas muy pequeñas que fácilmente pueden ser arrastrados por aguas de lluvia. La mayoría de métodos utilizados para minimizar el cadmio incluyen elevaciones de pH hasta 7 y remoción a través de procesos de precipitación. Estos sistemas a la larga no son sostenibles y tienden a tener costos altos, en comparación con nuestro sistema, las plantas y la materia orgánica podrían ser capaces de cambiar sus estados de oxidación y de ese modo inmovilizar la presencia de este metal en el agua. Así mismo, la materia orgánica presente en el Yanahumus, puede ser capaz de adsorber o absorber este elemento.

### **Cromo**

La mayoría de los trabajos referentes a la tratabilidad de las aguas residuales de la industria de curtido presentan resultados de la remoción de cromo trivalente obtenidos en el pre-tratamiento de los efluentes totales de las plantas. Dependiendo de las características específicas de las aguas residuales estudiadas, se reportan resultados diferentes, desde 90 hasta 99.9% de remoción, obtenidos con la aplicación del proceso de coagulación - sedimentación utilizando coagulantes minerales, en forma individual o combinada (Zegarra, 2007). Estos procesos como mencionamos anteriormente, son altamente costoso y no sostenibles en el tiempo. Nuestra investigación muestra una tecnología mucho más económica y de fácil mantenimiento. Para el caso de aguas ácidas de mina cumple con los LMP.

### **Hierro**

Varios estudios sugieren procesos de aireación previos al tratamiento del hierro. Por ejemplo, La creación de un canal de aireación que se creó en Comarsa fue que les ayudo a que el  $Fe^{+2}$  pase a ser  $Fe^{+3}$  por unas pequeñas láminas de 35 cm de longitud para que se pueda oxigenar y así pueda ayudar a la reducción del Fe al momento de entrar al humedal que se construyó y lograron bajar los ppm de Fe. (Blancas, 2011). En la mayoría de casos la presencia de OD permite la oxidación, hidrólisis y precipitación de Fe (II). En nuestro sistema debido a que se tienen funciones óxicas y anóxicas todos estos procesos pueden encontrarse en un solo sistema ayudando a la maximización de los procesos químicos y minimización de metales.

### **Zinc**

En nuestro sistema humedal la mayoría de metales por los procesos de aireación y oxidación e incremento de pH tienden a precipitar, el zinc es un elemento que tiene gran afinidad por los oxihidroxidos de Fe, especialmente en un pH alrededor del neutro (Carroll et al., 1998). En nuestro sistema al llegar a un pH neutro estos procesos pudieron ayudar a la minimización de las concentraciones de zinc al punto de poder cumplir con los LMP. En aplicaciones futuras, la eliminación de Zn podría ser mejorada agregando una capa de piedra caliza después del proceso unitario final para provocar la formación de esmitsonita; la cual es una propuesta relativamente nueva usada en tratamientos pasivos de DAM (Nuttall & Younger, 200; Nairn et al., 2010).

Es necesario recordar que en la actualidad el sector minero hace empleo de cal, dentro de los procesos de tratamiento de aguas ácida. Cia. Minera Sipán, La Zanja, Yanacocha, Tantahuatay y Goldfields en la actualidad, utilizan carbonato de calcio en sus procesos de tratamiento generando volúmenes de lodos, con características alcalinas, y de un gran problema para su evacuación, almacenamiento y disposición final.

En conclusión el sistema pasivo es una tecnología de bajo costo, fácil implementación, durabilidad y capaz de cumplir con lo exigible con la legislación ambiental de modo que no impacte en el medio ambiente.

## CONCLUSIONES

- Diseñamos y evaluamos el uso del humedal en serpentín, que permita incrementar el pH y disminuir la concentración de metales del agua ácida proveniente del depósito de desmonte unsuitable IV Yanacocha.
- Caracterizamos el drenaje ácido de mina del depósito de desmonte unsuitable IV Yanacocha Norte.
- Determinamos la combinación de plantas más el yanahumus mejorando la calidad del efluente.
- Determinamos el área adecuada y caudal para funcionamiento del humedal.
- Evaluamos el incremento del pH en los diferentes tratamientos resultando factible para los 3 tratamientos.
- Evaluamos el incremento del caudal en los 3 humedales construidos dando como el más beneficioso el de 25ml/min.
- Evaluamos la remoción de metales en los tres tratamientos para comparar con los LMP dando como mejor resultado el flujo de 25 ml/min.

## RECOMENDACIONES

- Implementar un sistema Wetland a nivel piloto en el depósito de desmonte unsuitable IV de Compañía Minera Yanacocha. Esto con el fin de que se puedan validar los resultados en campo.
- Seguir investigando como disminuir algunos metales que se pueden tratar con este sistema pasivo pero que no alcanzan los LMP para un agua tipo 3 y adecuarla al mismo como parte de un pre-tratamiento que se puede adaptar luego de la salida del humedal.
- Investigar que otras plantas cumplen la función de reducción de metales o eliminación de los mismos que puedan ayudar a mejorar el sistema pasivo que propongo y a la vez que estas plantas puedan adaptarse en la zona que se va a ejecutar el humedal.

## REFERENCIAS

- Aduvire, O. y Aduvire, H. 2005. Aguas ácidas de mina: caracterización, mineralogía y microbiología. Revista INGEOPRES 141. Madrid (España). 52-62.
- Aduvire, O., Aduvire, H., Mazadiego, L. (2005), Biogeoquímica y fases mineralógicas en drenajes ácidos de mina.
- Aduvire, H., López-Jimeno, C. y Aduvire, O. 2000. Inventario y evaluación del riesgo por ordenador durante la clausura de minas abandonadas. *Industria y Minería*, 341, pp. 37-42.
- Aduvire, O., López-Jimeno, C. y Aduvire, H. 1997. Evaluación del impacto ambiental en la minería (Parte 1). *Latinominería*, 23, pp. 59-64.
- Aduvire, O., López-Jimeno, C. y Aduvire, H. 1997. Evaluación del impacto ambiental en la minería (Parte 2). *Latinominería*, 26, pp. 59-70.
- Aduvire, H., López Jimeno, C. y Aduvire, O. 1999. Inventory and risk assessment using a Pc during closure procedure of abandoned mines. *Mine, Water & Environment Congress*. Sevilla (España) ,13 pp.
- Alza, A. (2007), Uso de Geomallas Bioaxiales para cobertura de relaves en la zona minera de Morococha.
- Ansola, G; 2003. Utilización de humedales artificiales en la depuración de aguas residuales. En el agua, un bien para todos. *Conservación, recuperación y usos 6º Jornales Ambientales*. Salamanca. Ed. P. Ramos, S.A; pp. 145-170.
- Barton, LL. Tomei, FA. 1995: Characteristics and activities of sulfate reducing.
- Béchar, G. Rajan, S. Gould, WD. 1993: Characterization of microbiological processes for the treatment of acid mine drainage. In: Torma AE, Apel ML.
- Brassard, P., Rosa, F. and Mudroch, A., 1994: Disposal of acid drainage generating mine tailings in lakes and man-made reservoirs. *Environmental Technology*. No. 17(10), p. 1059-1069.
- Brierly CL (eds). *Biohydrometallurgical Symposium, Minerals, Metals and Materials Society*, Warrendale, PA, Vol 2, p. 277-286.
- Castro, JM. Wielinga, BW. Gannon, JG. Moore, JN. 1999: Simulation of sulfate – reducing bacteria in lake water from a former open-pit mine through addition of organic wastes. *Water Environ Res*. No. 71, p. 218-223.
- Cohen, R.R.H. &Staub, M. W. 1992. Technical manual for the design and operation of a passive mine drainage treatment system. Colorado School of Mines, 1992. 69pp.

- Colegio de Ingenieros del Perú, Capítulo de Metalurgia (2001), 2do Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería – Trabajos Técnicos.
- Delgado, J.L. 2006: Características del futuro lago que se formará en la corta de Meirama. Reunión científico técnica. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo.
- Dempsey, B.A., Roscoe, H.C., Ames, R., Hedin, R. & Jeon, B-H. (2001). Ferrous Oxidation Chemistry in Passive Abiotic Systems for the Treatment of Mine Drainage. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1, 81-88.
- Díaz Álvarez, J. (2013). Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato Caldas.
- Dvorak, DH. Hedin, RS. Edenborn, HM. McIntire, PE. 1992: Treatment of metal-contaminated water using bacterial sulfate reduction: results from pilot- scale reactors. *Biotechnol Bioeng*. No. 40, p. 609-616.
- Guerrero, J. 1998. Biotecnología en la disolución y recuperación de metales. 1er Congreso Peruano de Biotecnología y Bioingeniería. Trujillo, Perú. 8pp.
- Hallberg, K. y Johnson, B. 2002. Passive mine water treatment at the former Wheal Jane Tin Mine, Cornwall: important biogeochemical and microbiological lessons. *Land Contamination and Reclamation*, 11 (2), 213-220.
- Hedin, R.S., Nairn, R.W. & Kleinmann, R.L.P. 1994. Passive treatment of polluted coal mine drainage. Bureau of Mines Information Circular 9389, 35pp.
- Hedin, R.S., Watzlaf, G.R. y Nairn, R.W. (1994). Passive treatment of acid mine drainage with limestone. *Journal of Environmental Quality*, 23 (6), 1338-1345.
- Gusek, J. 2000. Reality check: passive treatment of acid mine drainage an emerging technology or proven methodology?. SME Annual Meeting. Salt Lake City, Utah, USA. 1-10.
- Johnson, B. y Hallberg, K. 2002. Pitfalls of passive mine water treatment. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 1, 335-343.
- Johnson, B. 2001. Importance of microbial ecology in the development of new mineral technologies. *Hydrometallurgy*, 59, 147-157.
- Hernandez, M., Marchand, E., Roberts, D. y Peccia, J. 2002. In situ assessment of active *Thiobacillus* species in corroding concrete sewers using fluorescent RNA probes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49, 271-276.
- Kabata Pendias, A. (2000) *Trace elements in soils and plants*. Third Edition. CRC Press. Boca Raton.

- López, E., Aduvire, O. y Baretino, D. 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (1), pp. 1-19.
- Mejía Dominguez C. (2011). *Metales pesados en suelos y plantas: contaminación y fitotoxicidad*. Departamento académico de bromatología y nutrición. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Huacho – Peú.
- Metcalf & Eddy (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. Third ed. McGraw-Hill, New York.
- MINAM. (2010). Límites Máximos Permisibles para descargas de efluentes mineros. 20/04/2018, de Ministerio de Energía y Minas Sitio web: [http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds\\_010-2010-minam.pdf](http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_010-2010-minam.pdf).
- Minitab 17 Statistical Software (2010). [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. ([www.minitab.com](http://www.minitab.com)).
- Meléndez, G. & Molina, E. (2002). *Fertilización foliar: principios y aplicaciones [Memoria]*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: UCR.
- Montoya J; Amusquivar J, Guzmán, G. y D, Quispe. (2010). THUSKA UMA: Tratamiento de aguas ácidas con fines de riego (la.ed). La Paz: embajada real de Dinamarca/fundación pieb.
- Nuttall, C.A. & Younger, P.L. (2000). Zinc Removal From Hard, Circum-Neutral Mine Waters Using a Novel Closed-Bed Limestone Reactor. *Water Research*, 34, 1262-1268.
- Pamo, E. L., Aduvire, O., & Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y minero*, 113(1), 3-21.
- Palomino Zevallos Johnny (1996). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad Mayor de San Marcos, facultad de química e Ingeniería Química.
- Paulson, A. 1997. The transport and fate of Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb and SO<sub>4</sub> in a groundwater plume and in downstream surface waters in the Coeur d'Alene Mining District, Idaho, USA. *Applied Geochemistry*, 12, 447-464.
- Pérez, A. & Torres, P. (2008). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaeróbico de aguas residuales fácilmente acidificable. *Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52.
- Poggi Valardo, H. Ríos Leal, E. Esparza García, F. García Mena, J. Sastre Conde, I. Zitomer, D. Macarie, H. and Garibay Orijel, C. (Setiembre, 2004) *Environmental*

*Biotechnology and Engineering*. Proceedings of the first international meeting on environmental biotechnology and engineering. Mexico.

- República del Perú, Ministerio de Energía y Minas (2006), Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.
- Ruihua, L., Lin, Z., Tao, T. & Bo, L. (2011). Phosphorus Removal Performance of Acid Mine Drainage from Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 190, 669-676.
- República del Perú, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (2006), Guía Para la Elaboración de Planes de Cierre de Minas.
- Rodríguez, R., Estupiñán, M., Iglesias, M., Castillo, E. (2007), Evaluación del riesgo ambiental de los pasivos ambientales de la cuenca alta del Río Santa en el departamento de Ancash, Perú.
- Rolandi, M. y Blasco, O. 2003. Instrumentación para el drenaje del talud NE de la mina de lignitos de Meirama. En: Pernía, J., Mulas, J. y Fernandez-Canteli, P. (eds), Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos. IGME, Madrid, 65-74.
- Romero, A., González, E., Galán, E. y Aguila, E. 2003. Geoquímica de las aguas del drenaje ácido de la mina Peña del Hierro. Papel de las eflorescencias en la inmovilización de elementos trazas. IV Congreso Ibérico de Geoquímica, Coimbra, Portugal, 252-255.
- Rubio Lopetegui, A. (2015). Estudio mecanístico de la lixiviación selectiva de arsénico en concentrados de cobre enargíticos, 56-70.
- Sanchez Espinoza, D. N. (2015). Interactive effects between lime, organic matter, and bacteria in the establishment of *Leymus cinereus* in mine tailings (Doctoral dissertation, Montana State University-Bozeman, College of Agriculture).
- SOMMERRFELD, ELMER O. (1999) "Iron and Manganese Removal Handbook", American Water Works Association.
- Strosnider, W.H., Winfrey, B.K. & Nairn, R.W. (2011a). Novel Passive Co-Treatment of Acid Mine Drainage and Municipal Wastewater. *Journal of Environmental Quality*, 40, 206-213.
- Schrenk, M., Edwards, K., Goodman, R., Hamers, R. y Banfield, F. 1998. Distribution of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans*: Implications for generation of acid mine drainage. *Science*, 279, 1519-1522.

- Shrihari, Modak, J., Kumar, R. y Gandhi, K. 1995. Dissolution of particles of pyrite mineral by direct attachment of Thiobacillus ferrooxidans. *Hydrometallurgy*, 38, 175-187.
- Steinhausler, F. 2001. *Biotechnology II and III*. University of Salzburg, Austria. 49pp.
- Taylor, J. y Waters, J. 2003. Treating ARD how, when, where and why. *Mining Environmental Management*, 11 (3), 6-9.
- Villachica, C. (2004), *Proceso NCD, Caso Exitoso de Transferencia de Tecnología Limpia Para el Tratamiento de Efluentes Ácidos de Mina*.
- Vega, J. 2012. Nivel de contaminación por metales pesados (Pb, Cu, Hg, As y Fe) en el río el Toro, Distrito de Huamachuco de la provincia de Sánchez Carrión, Durante el año 2009 - 2010. Edit. Escuela de Post – Grado de la UNT.
- Wood, T., Murray, K. y Burges, J. 2001. Ferrous sulphate oxidation using Thiobacillus ferrooxidans cells immobilised on sand for treating acid mine-drainage. *Applied Microbiology Biotechnology*, 56, 560-565.
- Williams, S. 2006. Crisis del agua: un problema de gobernabilidad, según el segundo Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Comunicado de prensa N° 2006-14. Edit UNESCOPRENSA. Washington – USA.
- Wright, W. y Nordstrom, K. 1998. Oxygen isotopes of dissolved sulfate as a tool to distinguish natural mining related dissolved constituents. *Technical Meeting Charleston South Carolina. Contamination from hard-rock mining, waste-resources, USA. Volume 1, Seccion A. 67-74.*
- Yahya, A. y Johnson, B. 2001. Bioleaching of pyrite at low pH and redox potentials by novel mesophilic Gram-positive bacteria. *Hydrometallurgy*, 63, 181-188.
- Yanacocha. (2006). Tratamiento del agua. 20/08/2017, de Yanacocha Sitio web: <http://www.yanacocha.com/2-tratamiento-del-agua/>.
- Yanacocha. (2010). Proceso de Producción. 15/08/2017, de Yanacocha Sitio web: <http://www.yanacocha.com/proceso-de-produccion/> .
- Younger, P.L. 1998. Design, construction and initial operation of full- scale compost-based passive systems for treatment of coal mine drainage and spoil leachate in the UK. In *proceedings of the international Mine Water Association Symposium on “Mine Water and Environmental Impacts”*, Johannesburg, South Africa (volume II) September 1998.
- Younger, P.L.; Curtis, T.P; Jarvis, A.P y Pennell; 1997. Effective passive treatment of aluminium-rich, acidic colliery spoil drainage using a compost Humedal at

Quaking houses, country Durham Bernal of the Chartered Institution of water and Environmental Management, 11, 200-20.

- Zegarra, L. (2007), Pontificia Universidade Católica Do Rio de Janeiro, Predição do Potencial de Drenagem Ácida de Minas Utilizando o Método Cinético da Coluna de Lixiviação.
- Zhu, C. y Burden, D. 2001. Mineralogical compositions of aquifer matrix as necessary initial conditions in reactive contaminant transport models. Journal of Contaminant Hydrology, 51, 145-161.

## ANEXOS

ANEXO N.º 1. Toma de muestras del punto n° 3 unsuitable IV-Yanacocha Norte.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 2. Zona de recolección de las plantas que serán utilizadas en el humedal - Yanacocha Norte.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 3. Toma de muestras del unsuitable IV para prueba en baldes.



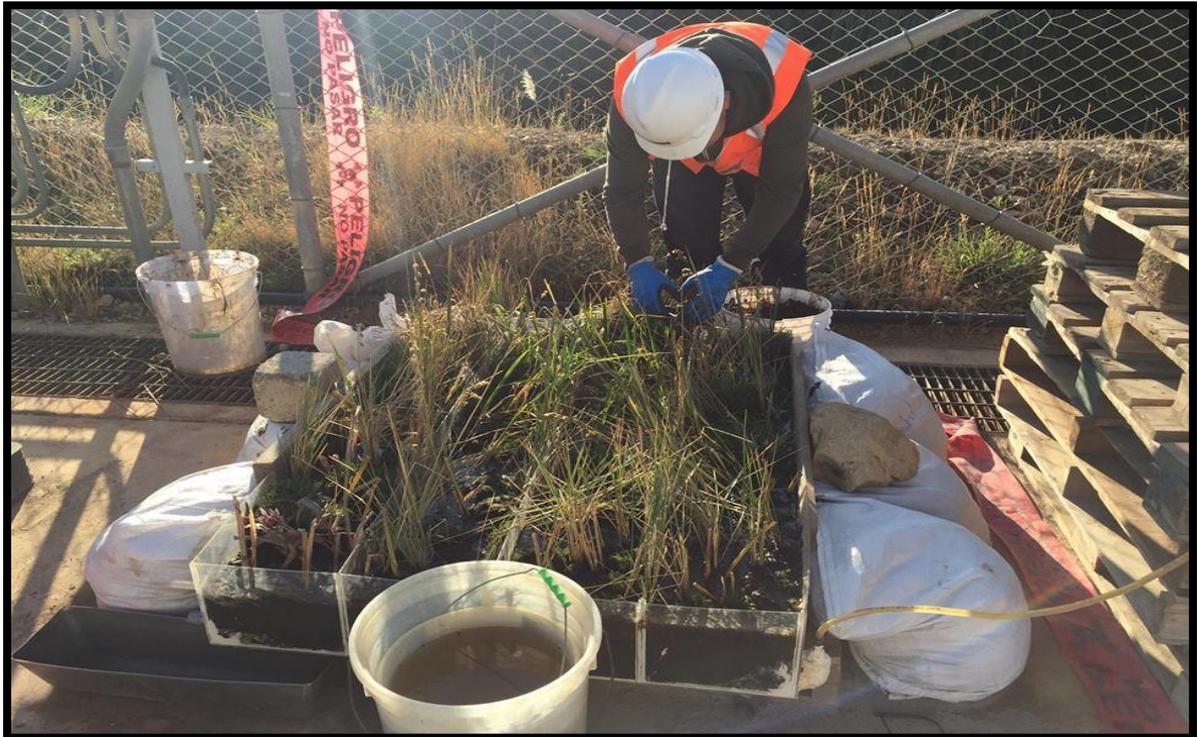
Fuente. Propio.

ANEXO N.º 5. Prueba de Baldes en el Laboratorio.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 6. Mantenimiento a las rejillas de cada pase de serpentín del humedal.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 7. Adaptación de las plantas con el agua ácida luego de 3 semanas.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 8. Humedal en actividad pasado 4 semanas y media del inicio de la prueba.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 9. Humedal tiempo transcurrido 5 semanas desde el inicio de la prueba.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 10. Humedal luego de 1mes y medio desde el inicio de la prueba.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 11. Humedal totalmente adaptado a los cambios del agua ácida luego de 2 meses.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 12. Salida del efluente por el humedal luego de recorrer los 4 serpentines.



Fuente. Propio.

ANEXO N.º 13. Humedal luego de 4 meses del inicio de la prueba, como se observa todas las plantas se adaptaron al contacto con el agua ácida.



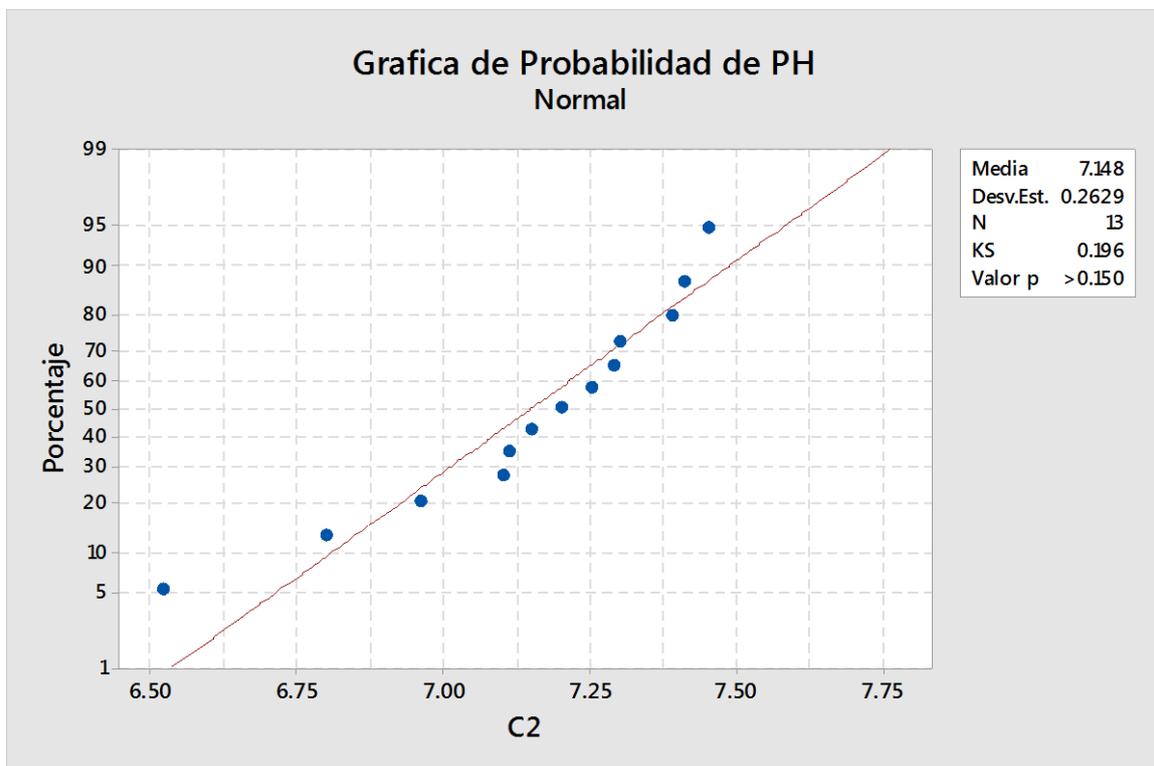
Fuente. Propio.

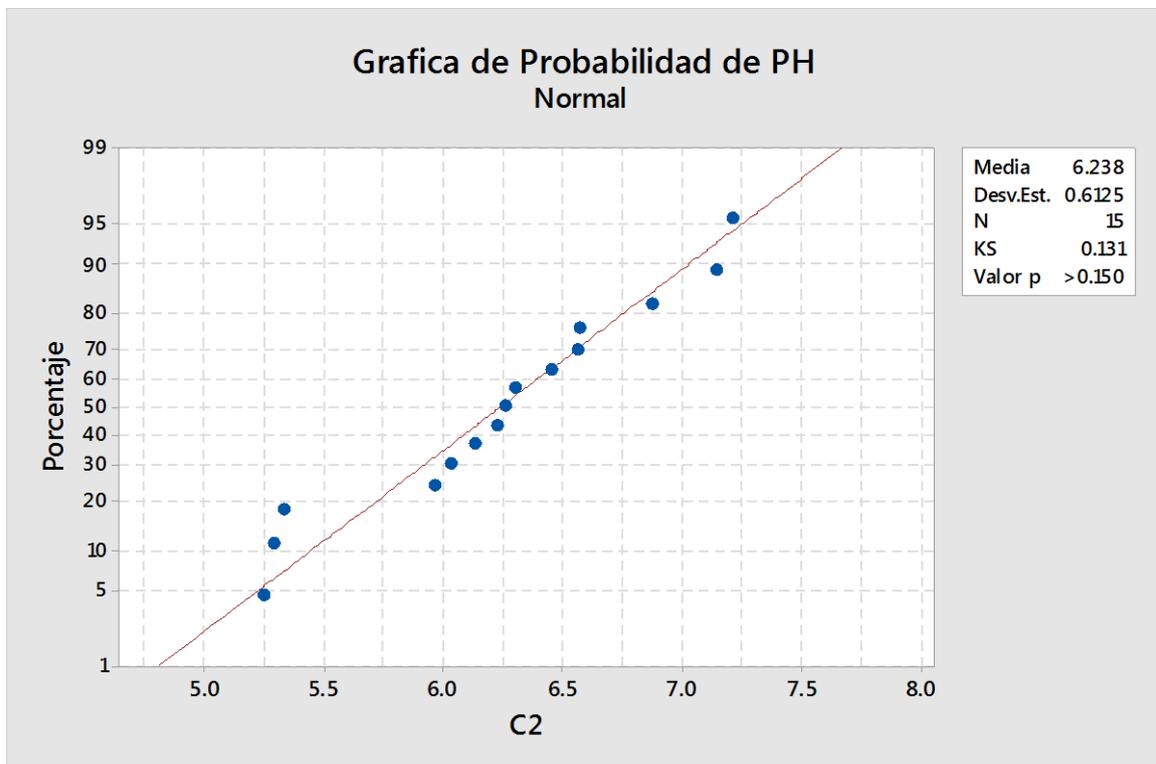
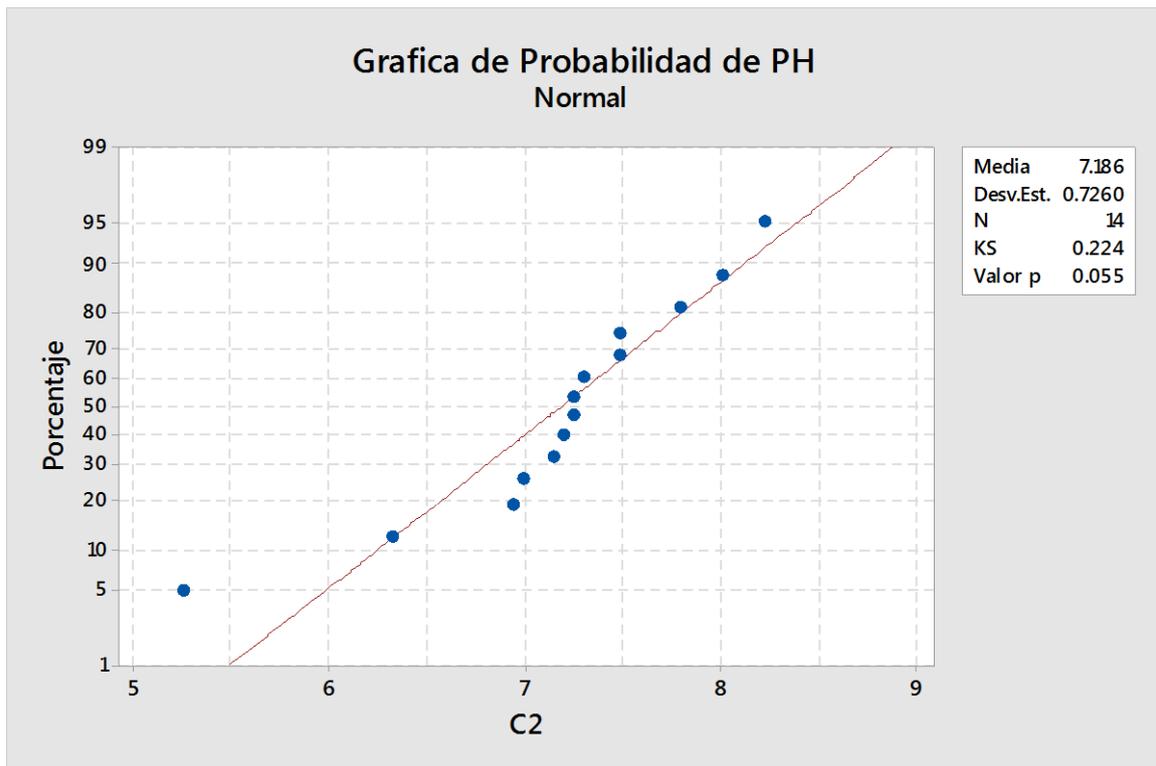
ANEXO N.º 14. Tabla de resultados de pH durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

pH 1(25ml/min)	pH 2(30ml/min)	pH 3(35ml/min)
7.41	8	7.14
7.15	8.22	6.87
7.11	6.99	6.57
7.1	7.48	6.26
7.29	5.26	6.22
7.3	7.79	5.33
7.39	7.19	5.96
7.45	6.32	6.3
7.25	7.48	6.45
6.8	7.25	6.56
6.52	6.94	6.03
7.2	7.25	5.29
6.96	7.3	5.25
7.14	7.21	6.13

C1	N	Media	Agrupación
C2	14	7.191	A
C1	14	7.1479	A
C3	14	6.169	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





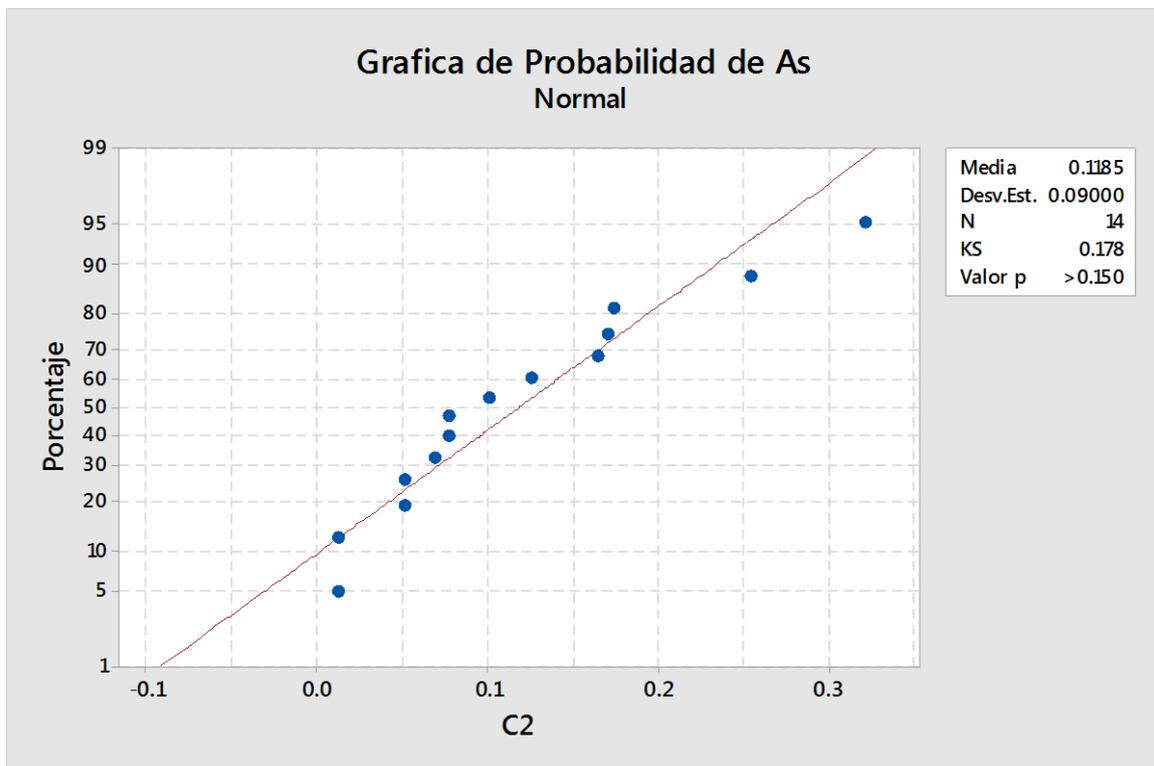
Fuente.Propio.

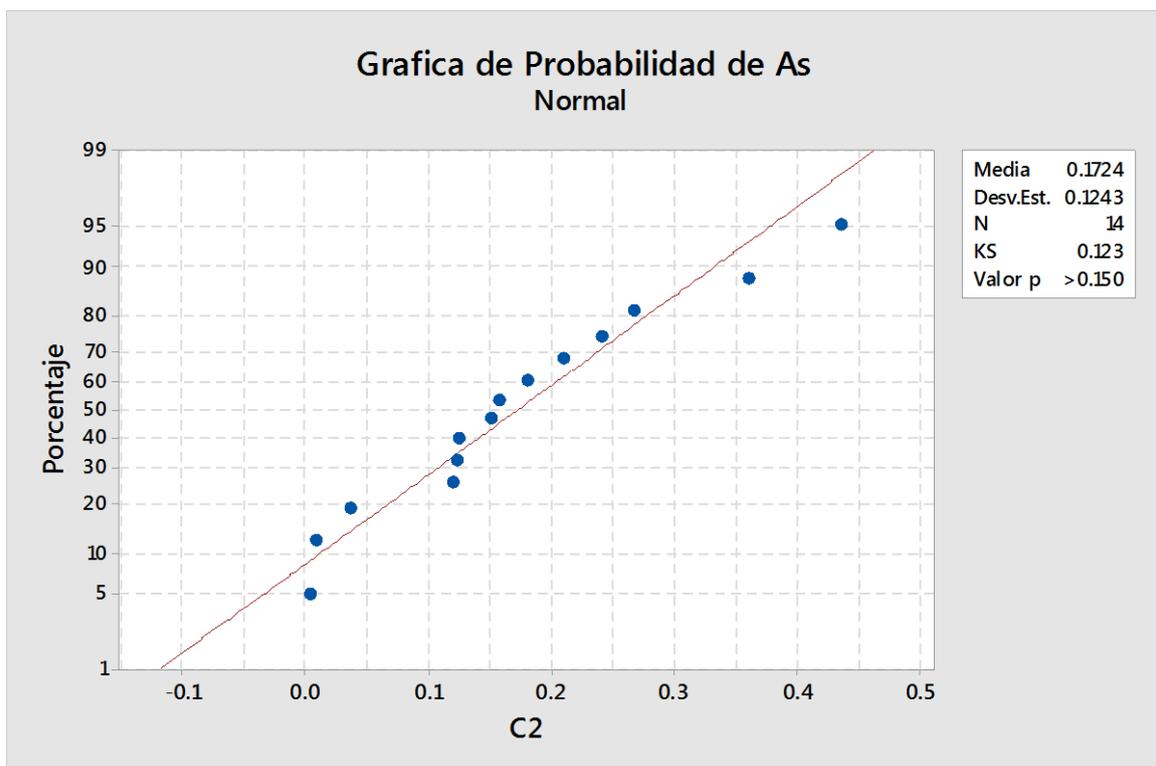
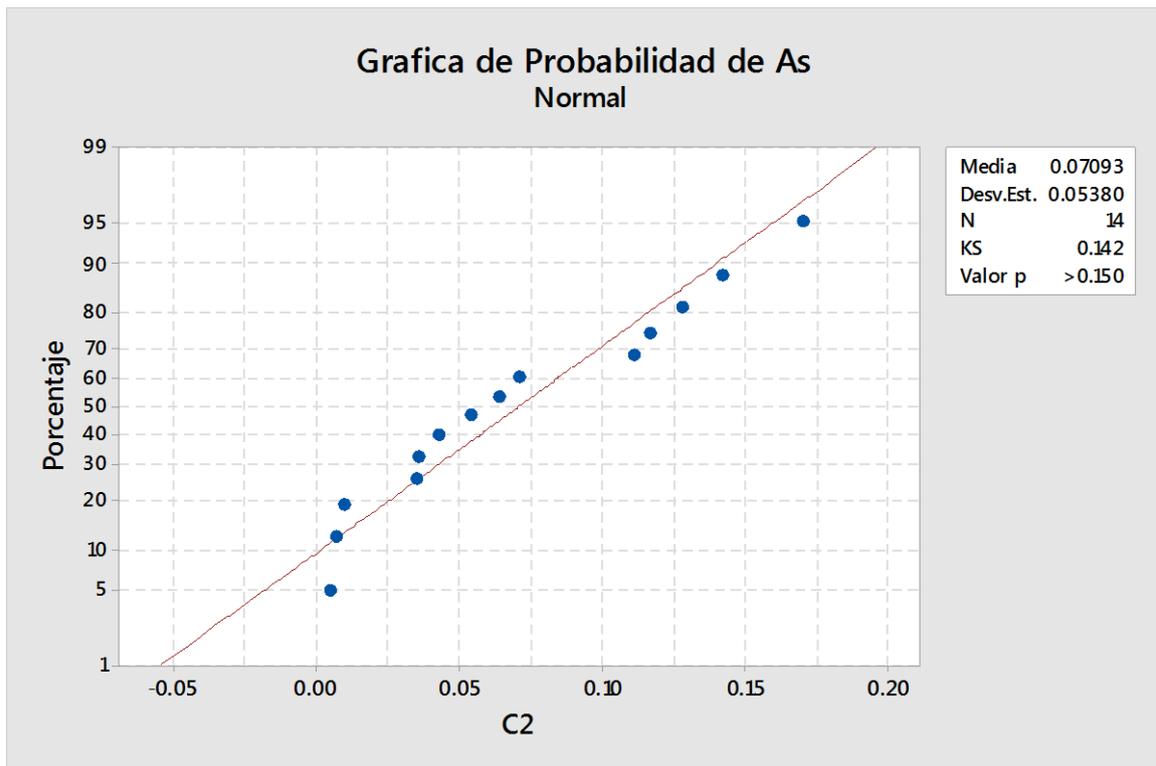
ANEXO N.º 15. Tabla de resultados de As durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

As(25ml/min)	As(30ml/min)	As(35ml/min)
0.101	0.17	0.124
0.125	0.036	0.008
0.174	0.007	0.12
0.077	0.035	0.15
0.165	0.117	0.003
0.012	0.01	0.037
0.051	0.128	0.18
0.254	0.054	0.21
0.17	0.142	0.434
0.077	0.005	0.36
0.321	0.111	0.266
0.012	0.071	0.157
0.051	0.043	0.241
0.069	0.064	0.123

C1	N	Media	Agrupación
C3	14	0.1724	A
C1			
C2	14	0.0709	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





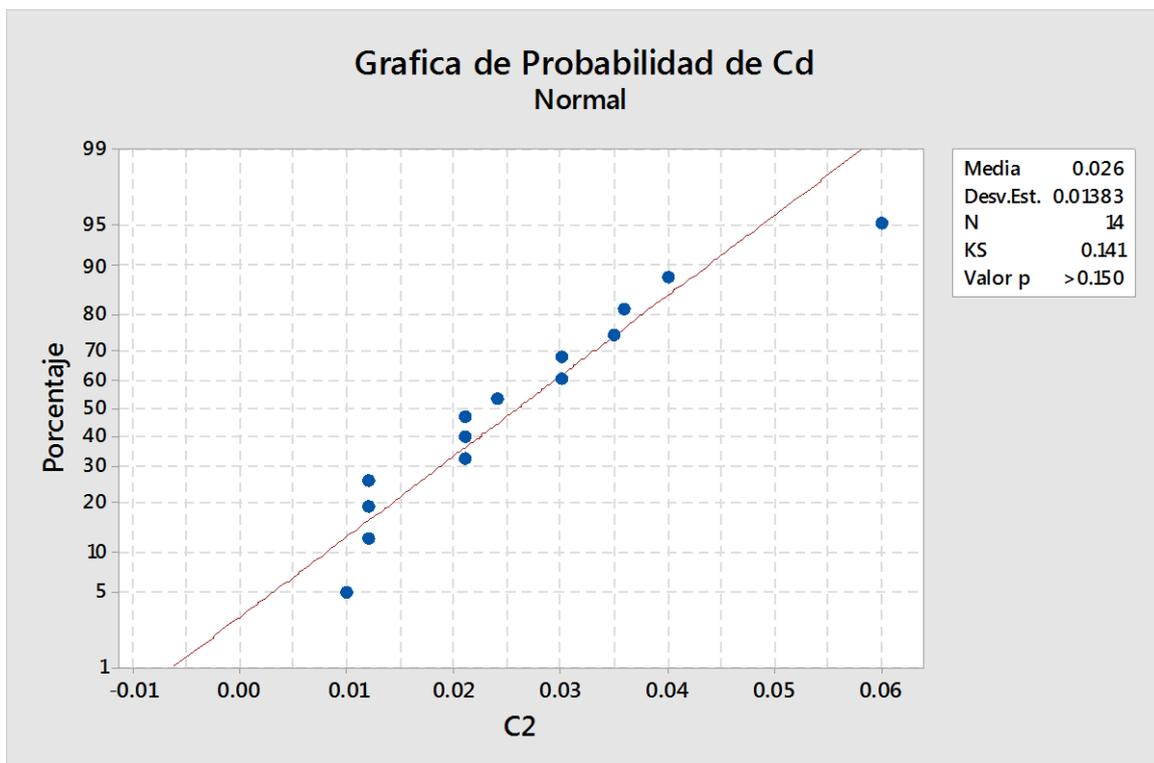
Fuente.Propio.

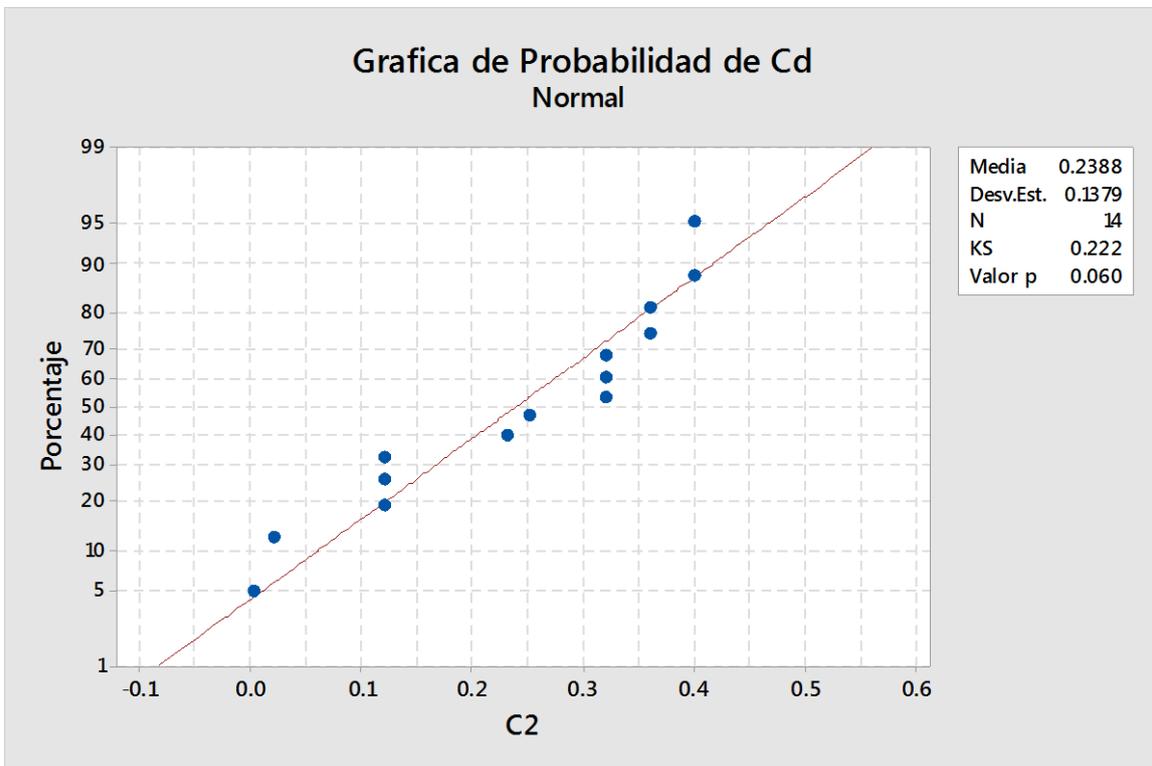
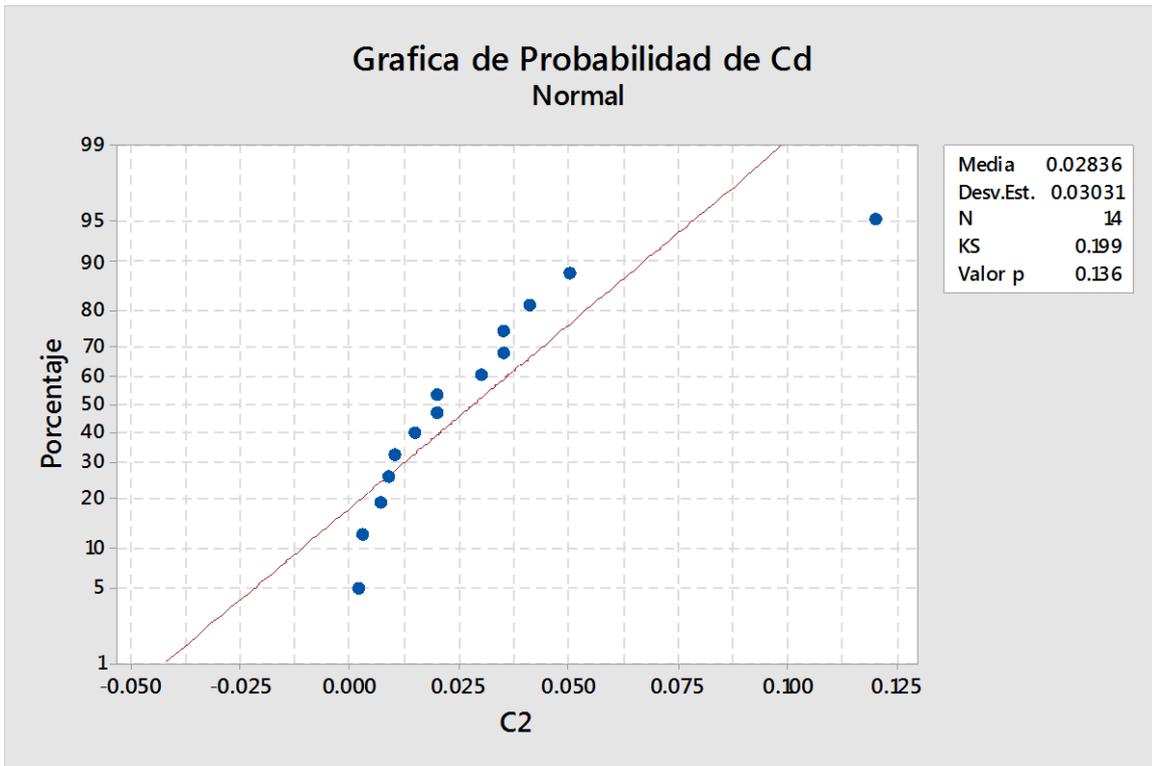
ANEXO N.º 16. Tabla de resultados de Cd durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

Cd(25ml/min)	Cd(30ml/min)	Cd(35ml/min)
0.01	0.02	0.002
0.03	0.03	0.12
0.021	0.041	0.23
0.04	0.02	0.12
0.021	0.015	0.32
0.035	0.01	0.25
0.012	0.007	0.021
0.024	0.009	0.32
0.012	0.003	0.4
0.036	0.002	0.32
0.021	0.035	0.36
0.06	0.05	0.12
0.03	0.035	0.4
0.012	0.12	0.36

C1	N	Media	Agrupación
C3	14	0.2388	A
C2	14	0.02836	B
C1	14	0.026	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





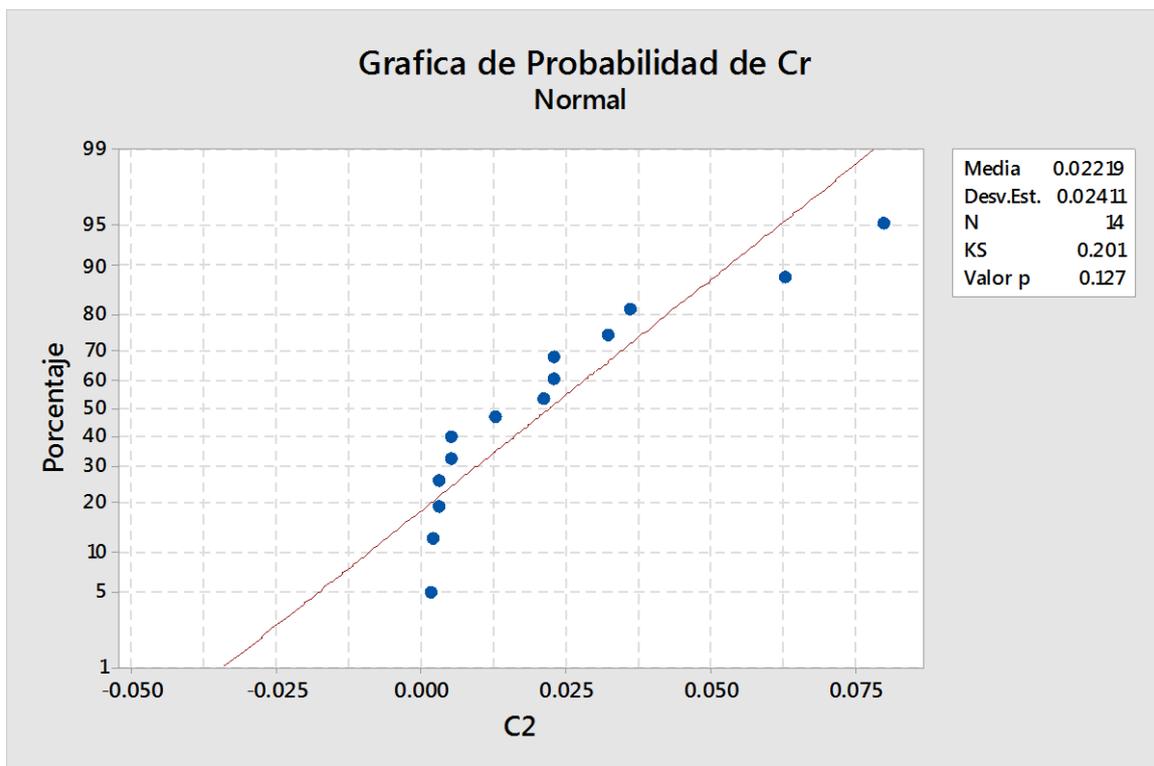
Fuente.Propio.

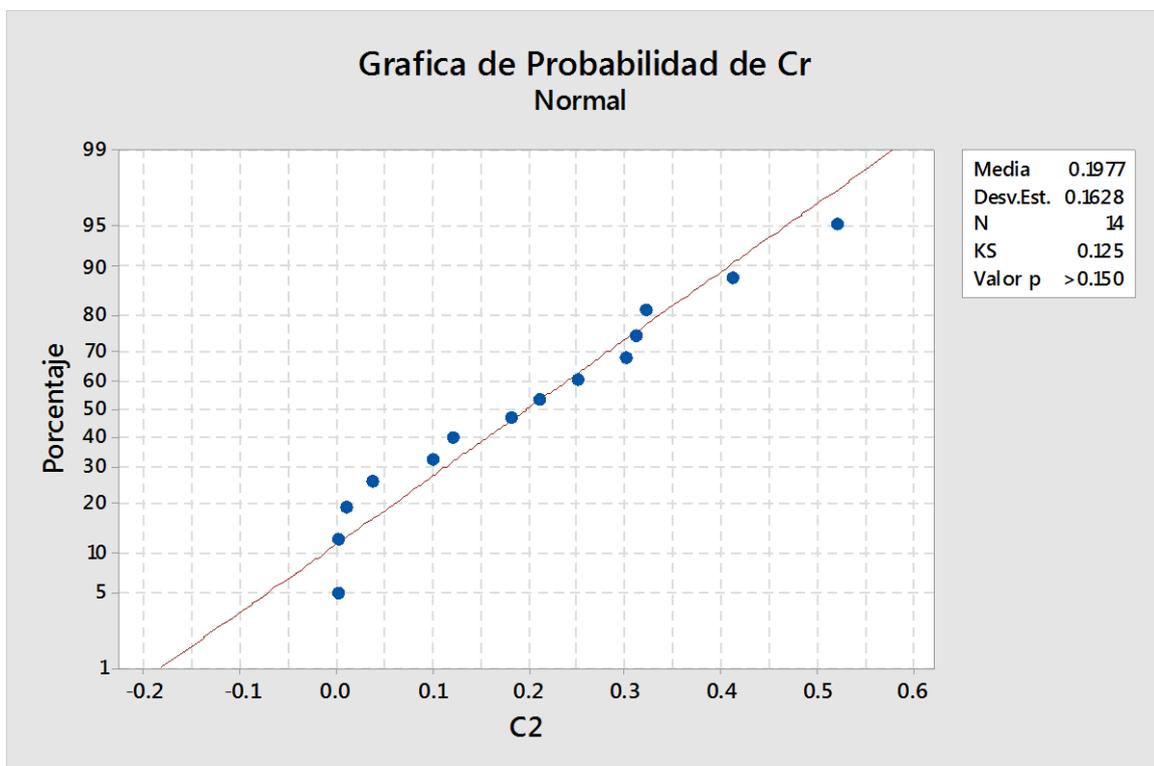
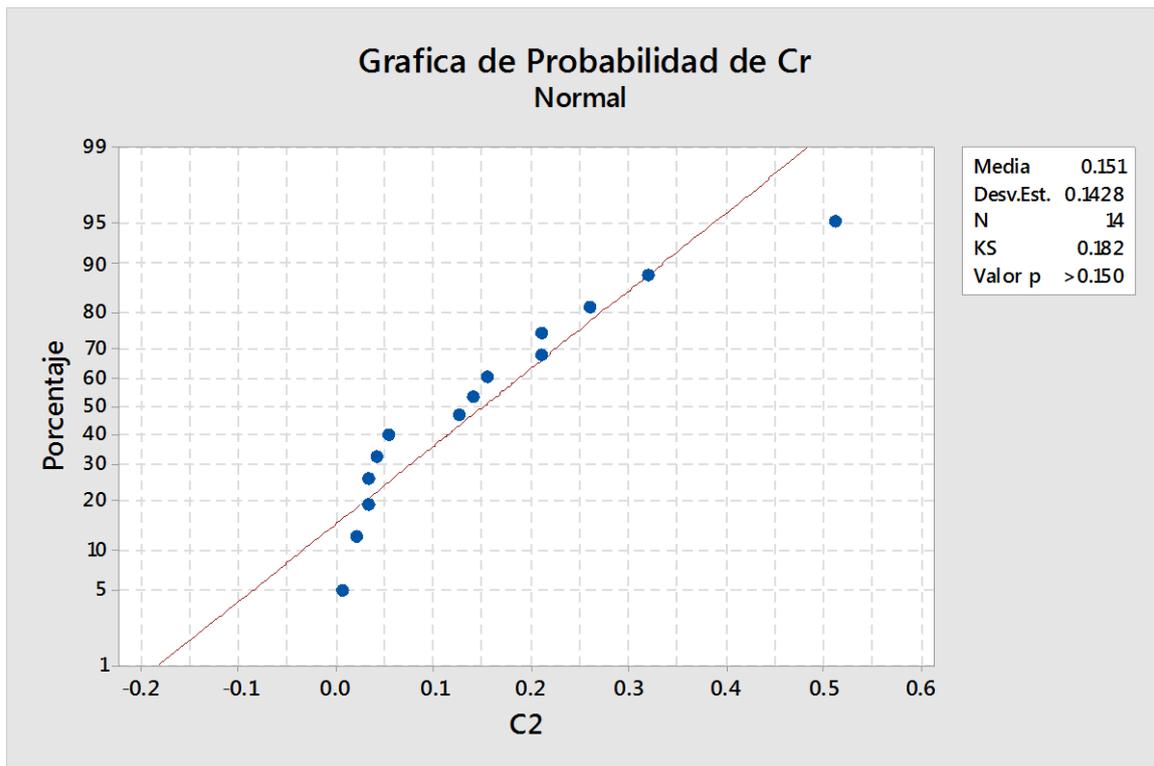
ANEXO N.º 17. Tabla de resultados de Cr durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

Cr(25ml/min)	Cr(30ml/min)	Cr(35ml/min)
0.0015	0.125	0.036
0.023	0.21	0.01
0.003	0.032	0.001
0.0021	0.51	0.18
0.08	0.21	0.32
0.023	0.14	0.001
0.003	0.041	0.52
0.005	0.32	0.41
0.063	0.26	0.3
0.021	0.021	0.1
0.036	0.053	0.25
0.0127	0.032	0.31
0.0324	0.154	0.21
0.005	0.006	0.12

C1	N	Media	Agrupación
C3	14	0.1977	A
C2	14	0.151	A
C1	14	0.02219	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





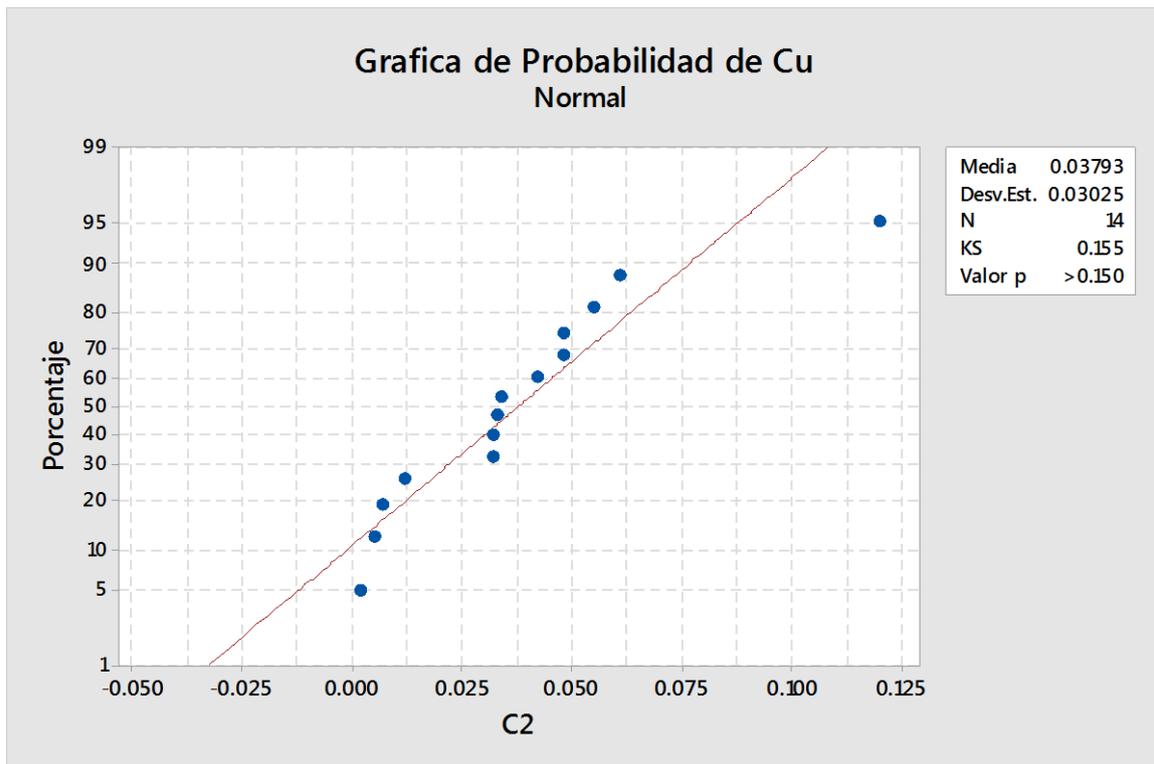
Fuente.Propio.

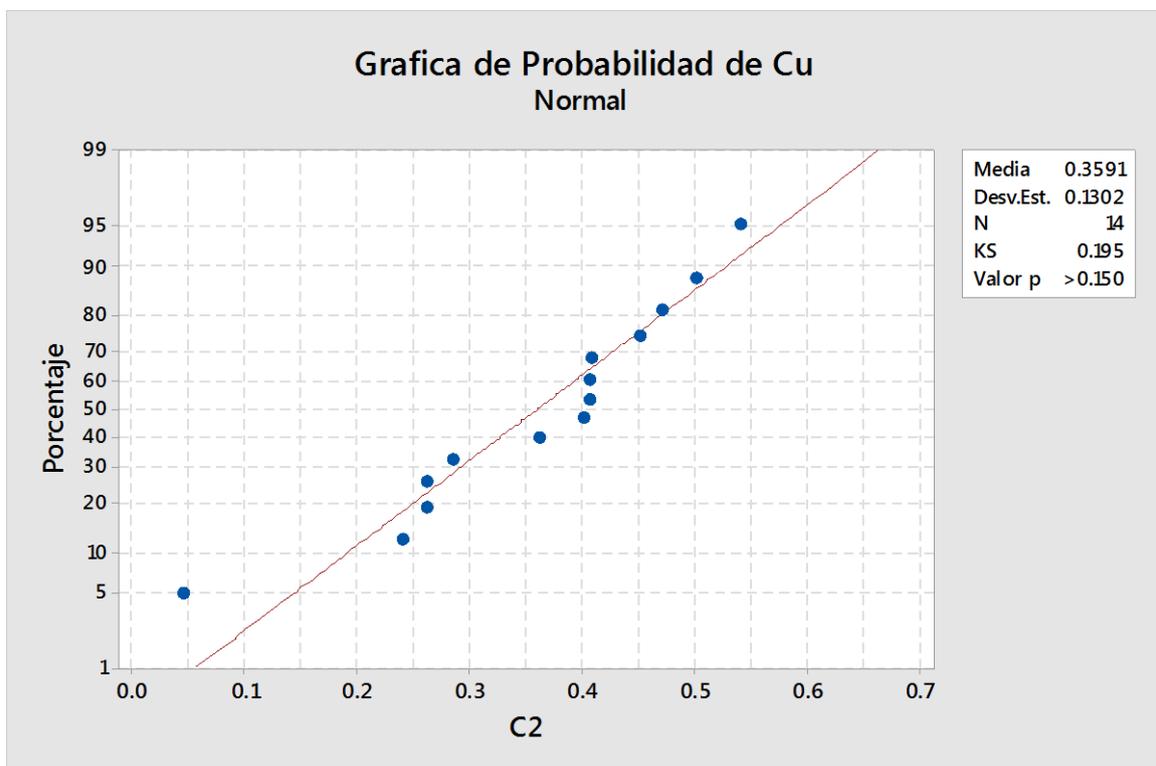
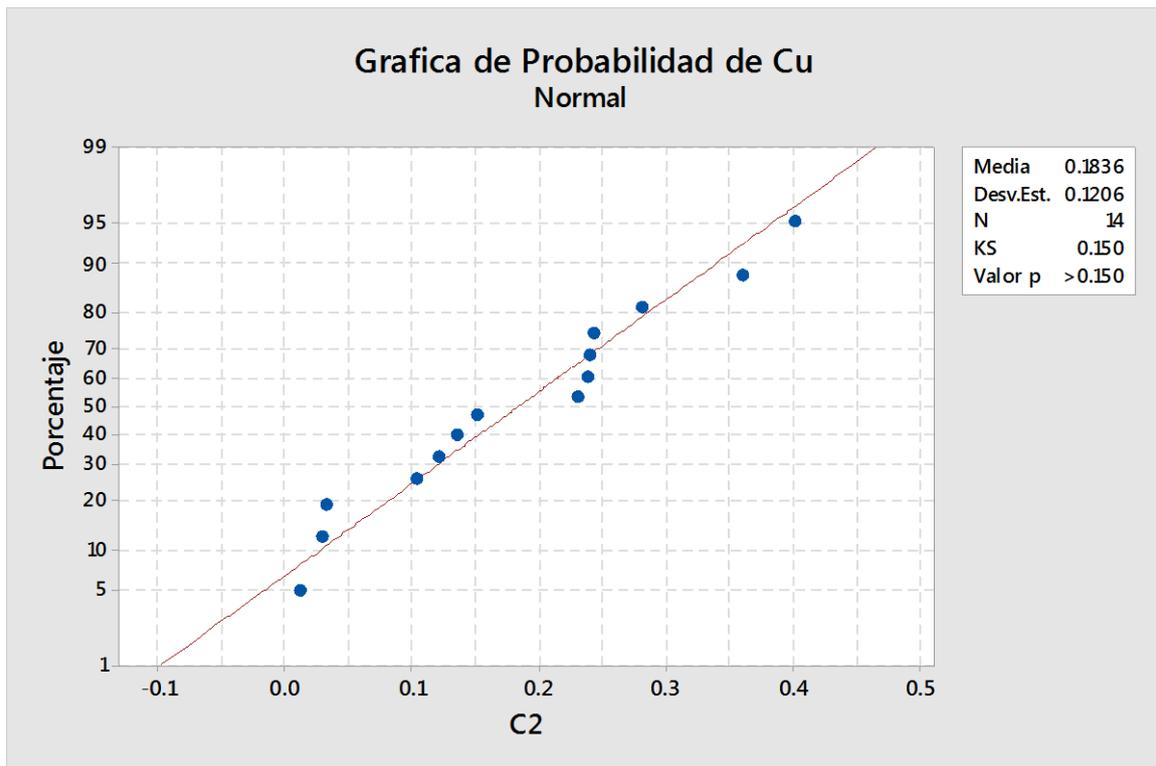
ANEXO N.º 18. Tabla de resultados de Cu durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

Cu(25ml/min)	Cu(30ml/min)	Cu(35ml/min)
0.055	0.12	0.45
0.002	0.28	0.26
0.007	0.103	0.36
0.12	0.23	0.24
0.048	0.36	0.044
0.061	0.242	0.54
0.034	0.15	0.26
0.032	0.237	0.5
0.005	0.029	0.284
0.012	0.032	0.406
0.048	0.24	0.4
0.033	0.012	0.408
0.042	0.135	0.405
0.032	0.4	0.47

C1	N	Media	Agrupación
C3	14	0.3591	A
C2	14	0.1836	B
C1	14	0.03793	C

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





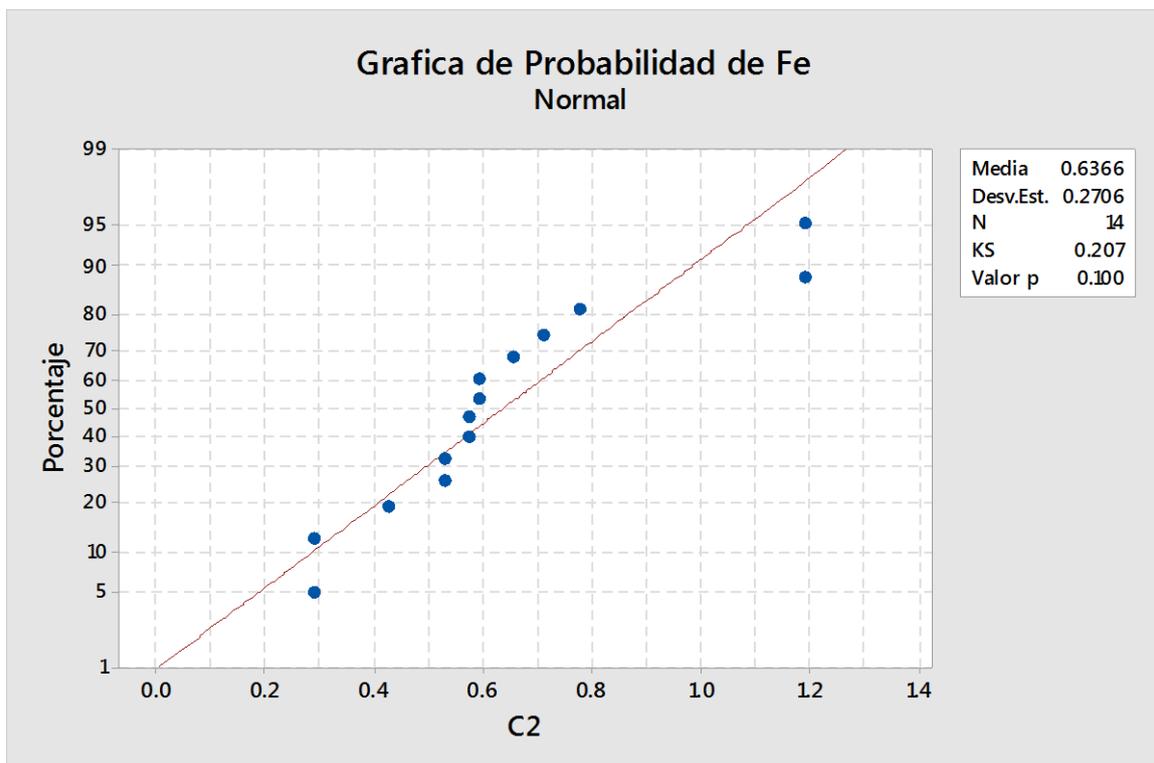
Fuente.Propio.

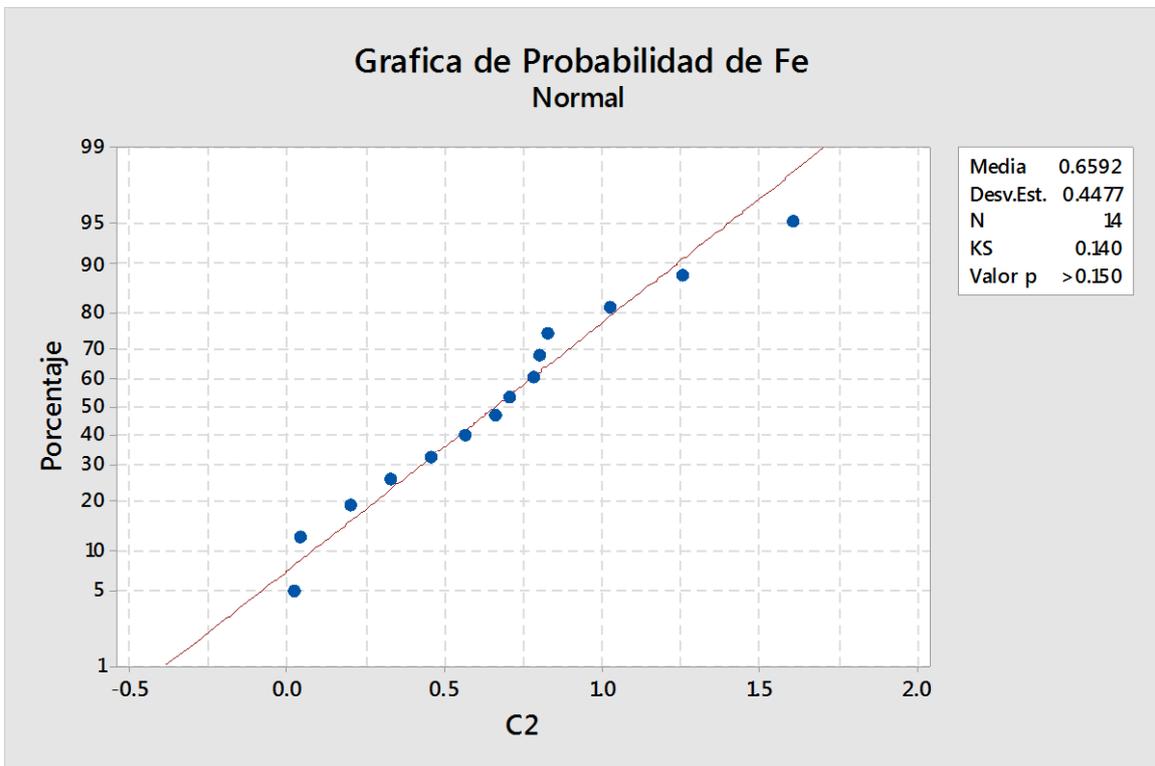
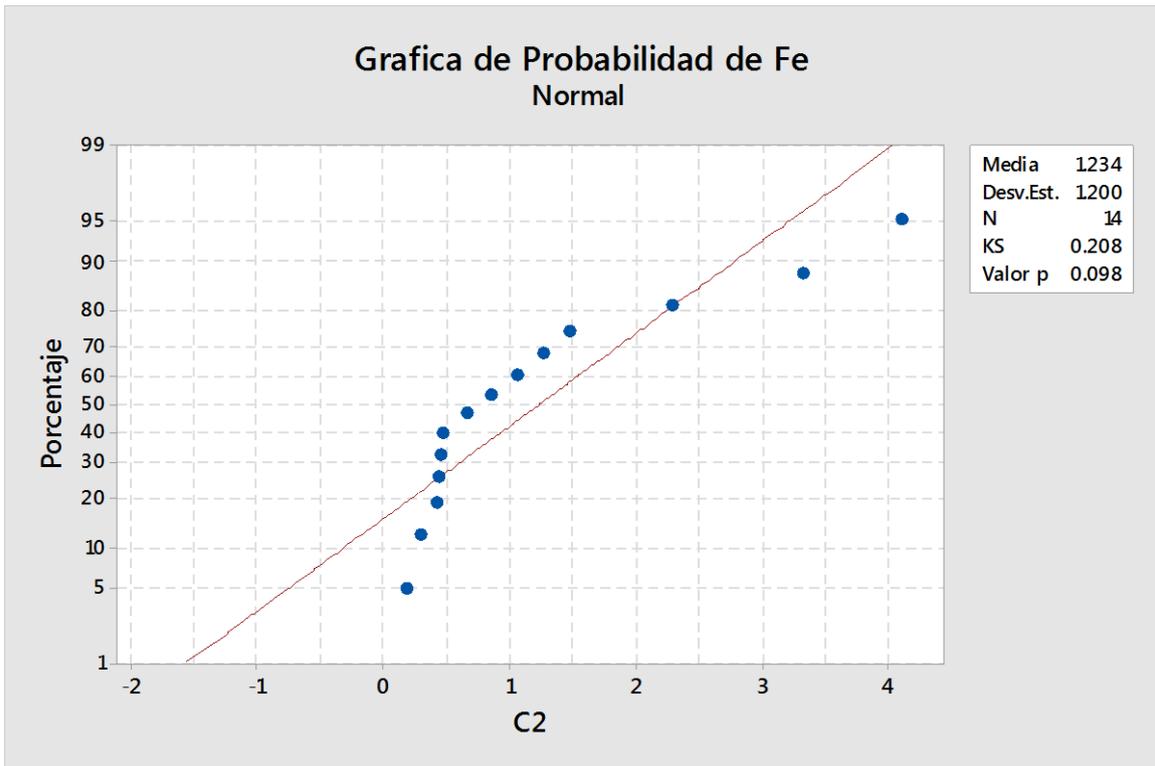
ANEXO N.º 19. Tabla de resultados de Fe durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

Fe(25ml/min)	Fe(30ml/min)	Fe(35ml/min)
0.775	0.654	0.451
0.424	0.848	0.704
0.711	1.065	1.601
1.188	0.178	0.02
0.291	3.325	0.037
0.53	1.47	0.2
0.593	4.096	0.797
0.572	1.261	0.78
0.654	0.456	1.251
1.188	2.292	0.826
0.291	0.294	0.323
0.53	0.472	0.559
0.593	0.426	0.657
0.572	0.436	1.023

C1	N	Media	Agrupación
C2	14	1.234	A
C3	14	0.659	A B
C1	14	0.6366	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





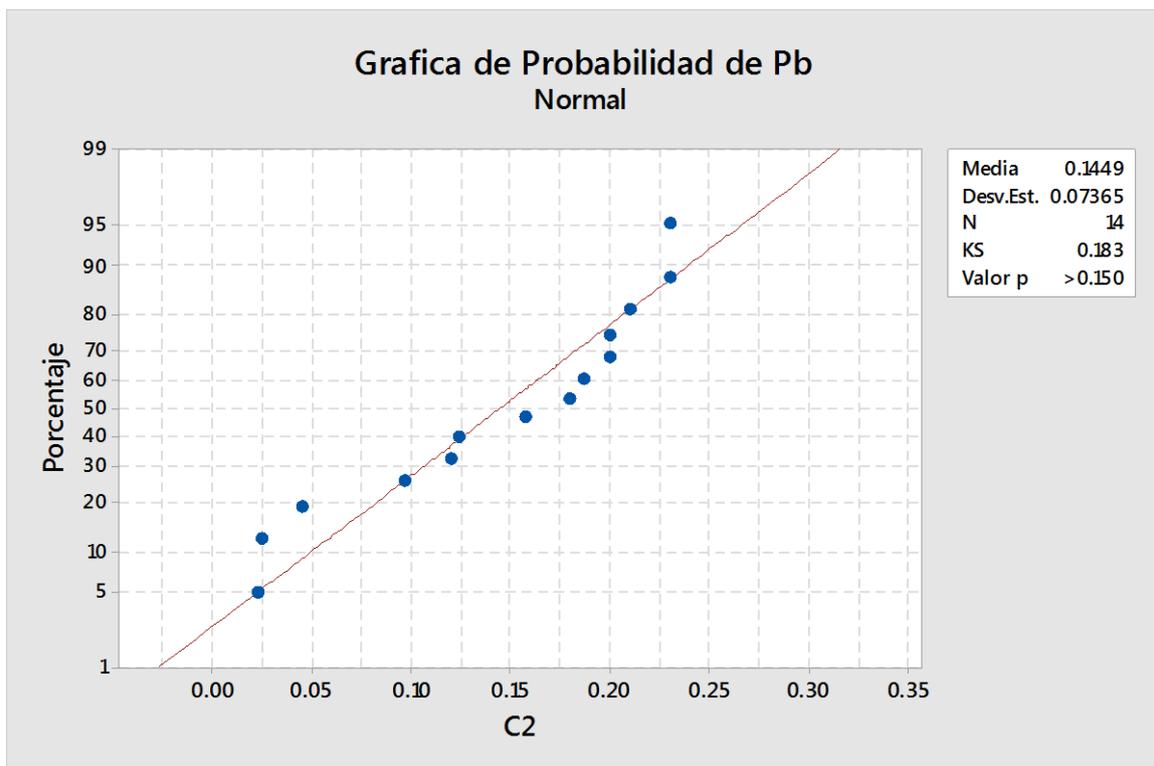
Fuente.Propio.

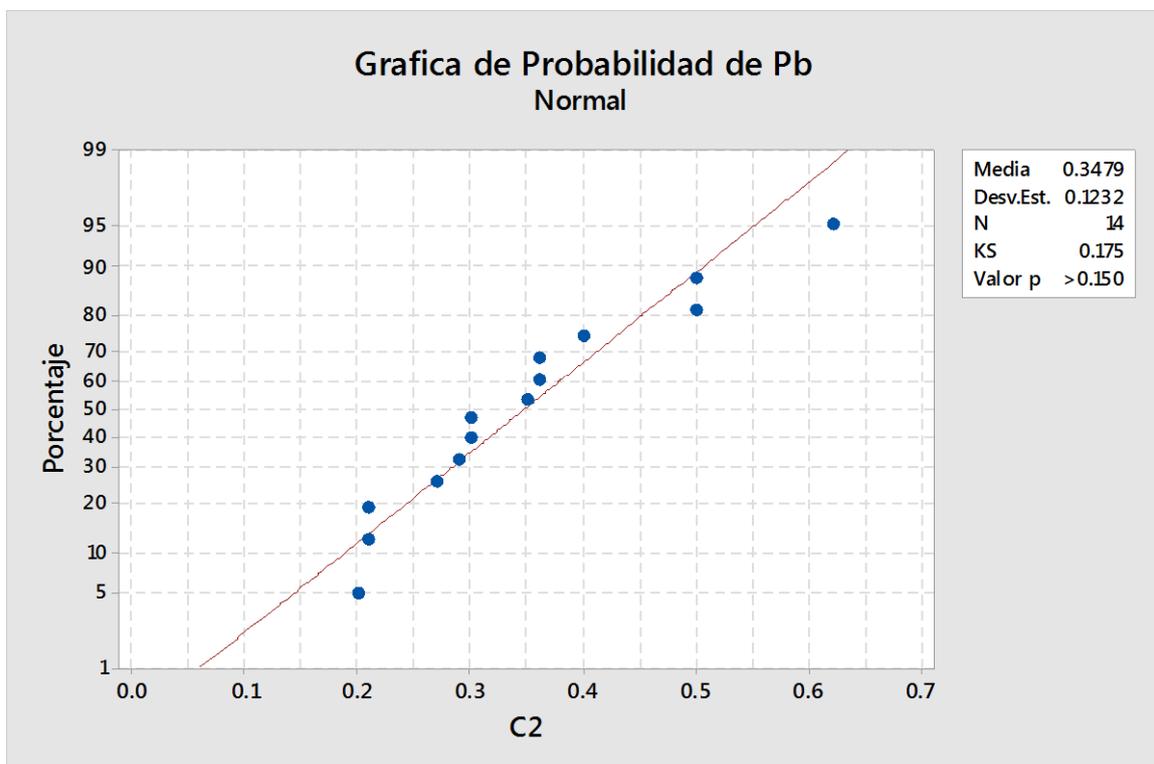
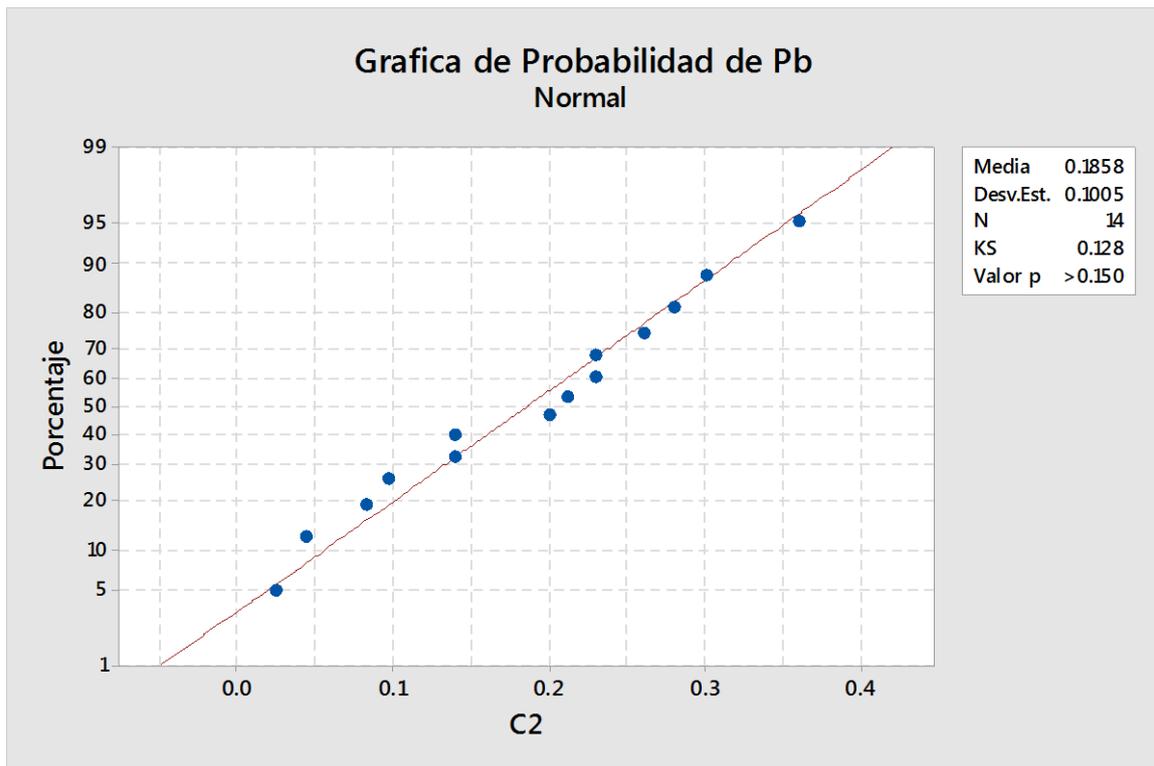
ANEXO N.º 20. Tabla de resultados de Pb durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

Pb(25ml/min)	Pb(30ml/min)	Pb(35ml/min)
0.124	0.097	0.5
0.045	0.23	0.36
0.21	0.14	0.4
0.023	0.025	0.2
0.18	0.083	0.62
0.2	0.044	0.3
0.025	0.212	0.21
0.12	0.23	0.27
0.097	0.14	0.29
0.23	0.3	0.3
0.187	0.28	0.21
0.157	0.26	0.36
0.2	0.2	0.5
0.23	0.36	0.35

C1	N	Media	Agrupación
C3	14	0.3479	A
C2	14	0.1858	B
C1	14	0.1449	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





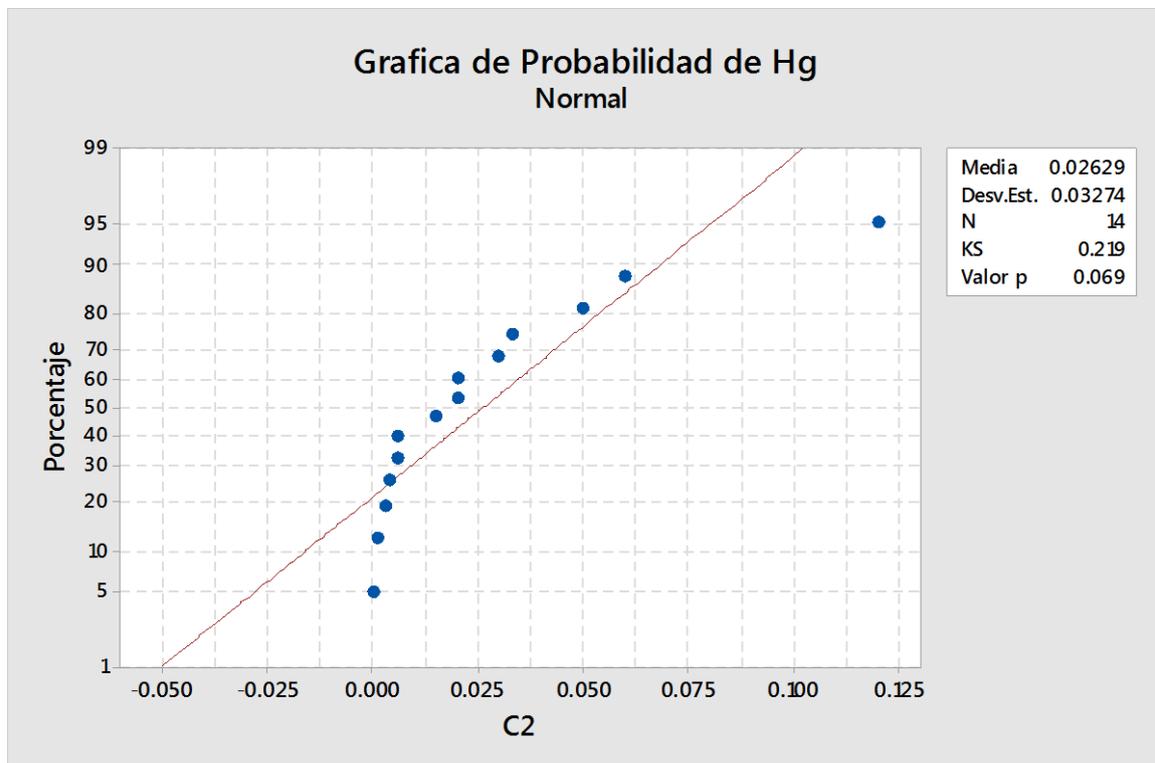
Fuente. Propio.

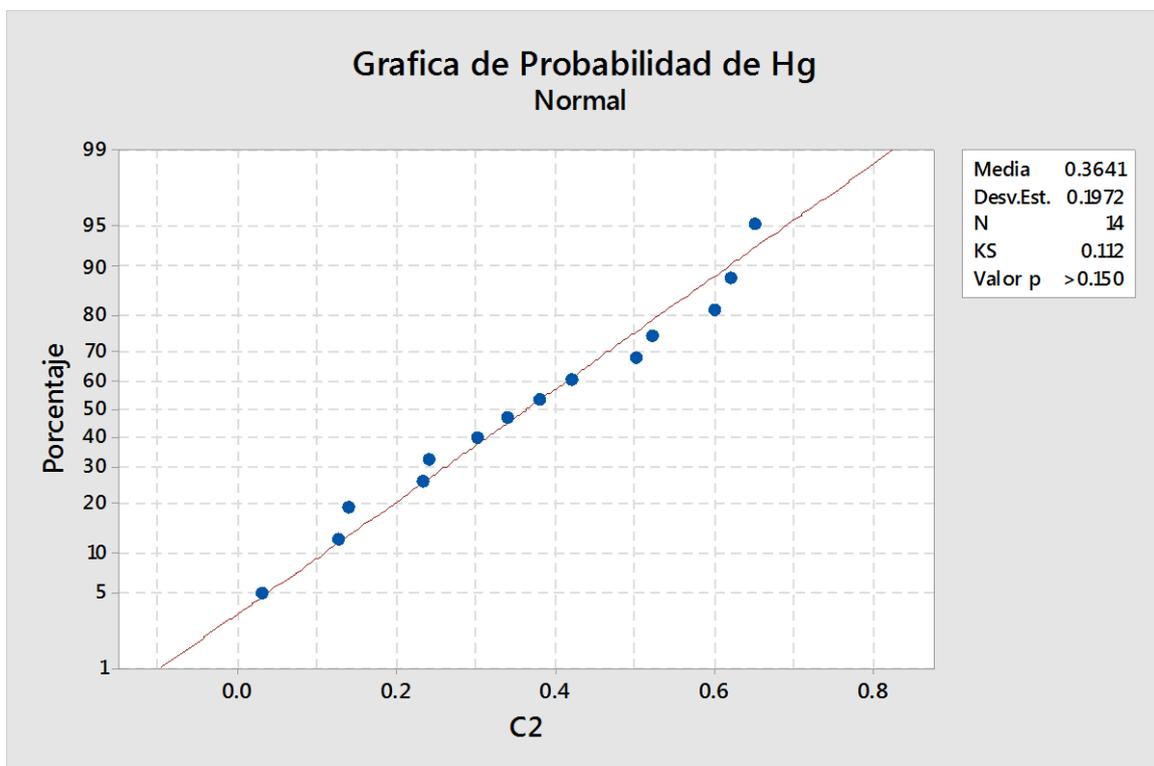
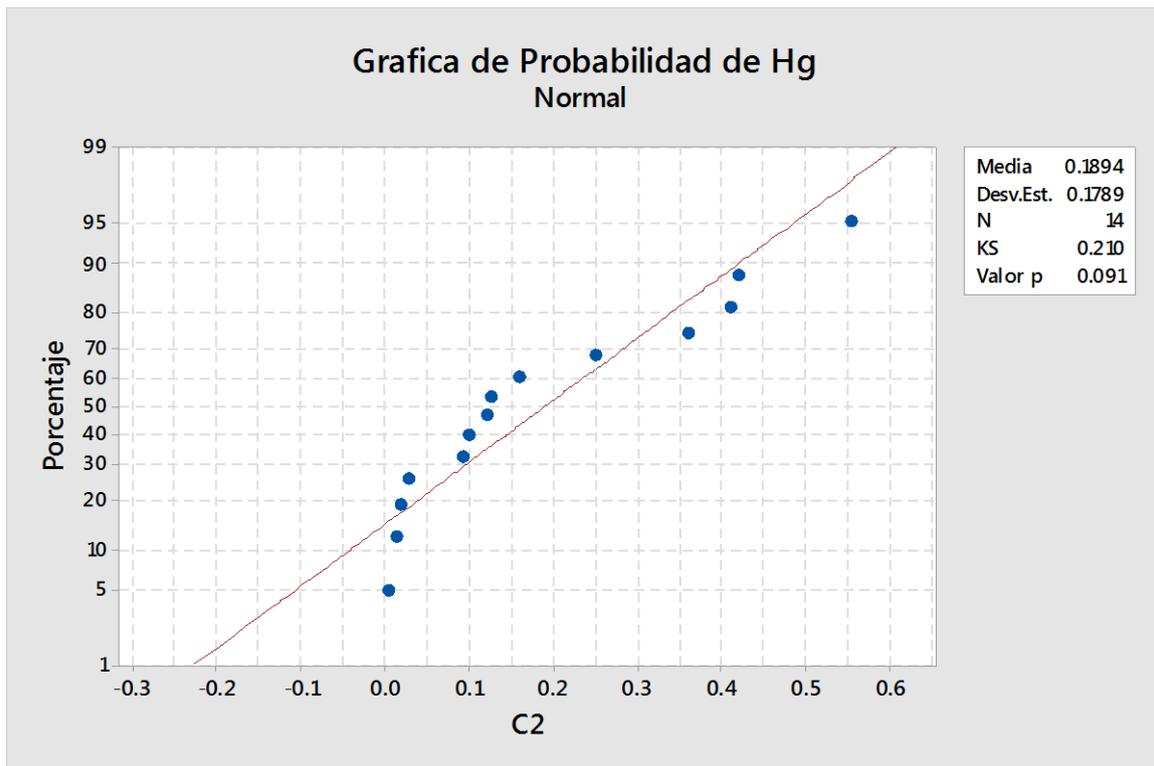
ANEXO N.º 21. Tabla de resultados de Hg durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

Hg(25ml/min)	Hg(30ml/min)	Hg(35ml/min)
0.001	0.554	0.139
0.015	0.36	0.233
0.02	0.41	0.3
0.004	0.098	0.52
0.02	0.017	0.62
0.006	0.126	0.03
0.12	0.014	0.5
0.03	0.028	0.126
0.05	0.12	0.6
0.003	0.003	0.42
0.06	0.25	0.24
0.033	0.42	0.34
0.006	0.159	0.65
0	0.093	0.38

C1	N	Media	Agrupación
C3	14	0.3641	A
C2	14	0.1894	B
C1	14	0.02629	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.





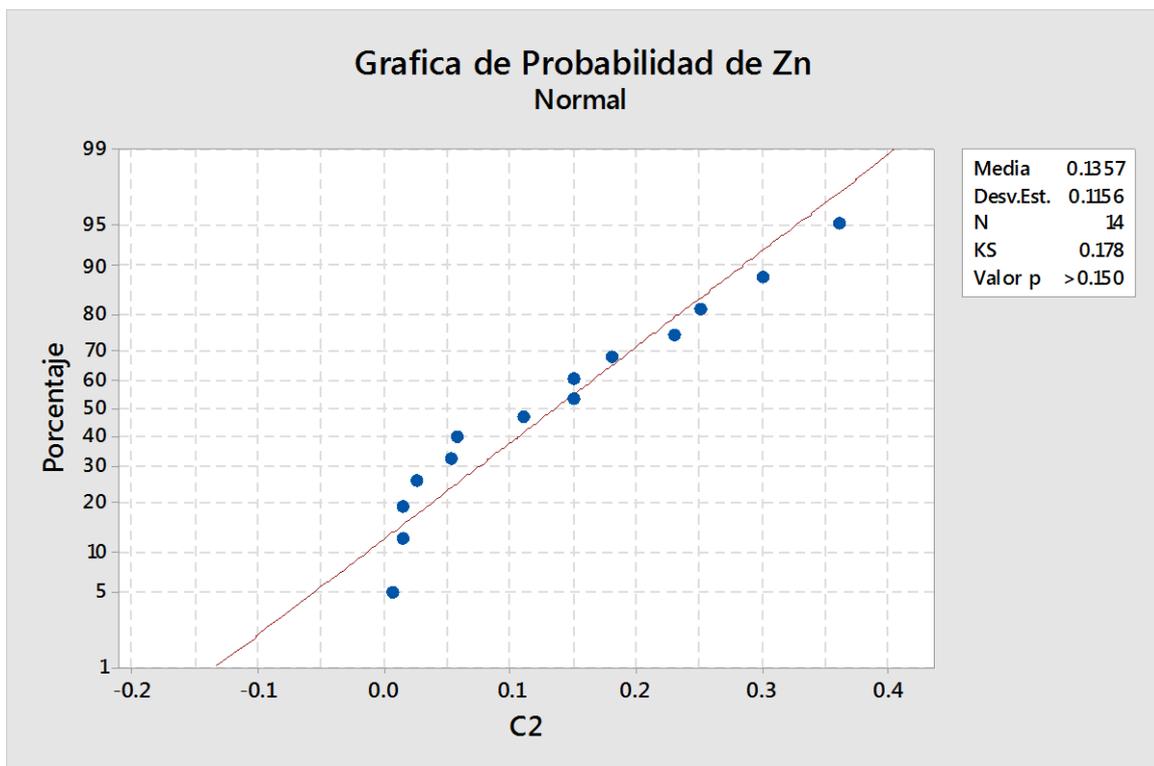
Fuente. Propio.

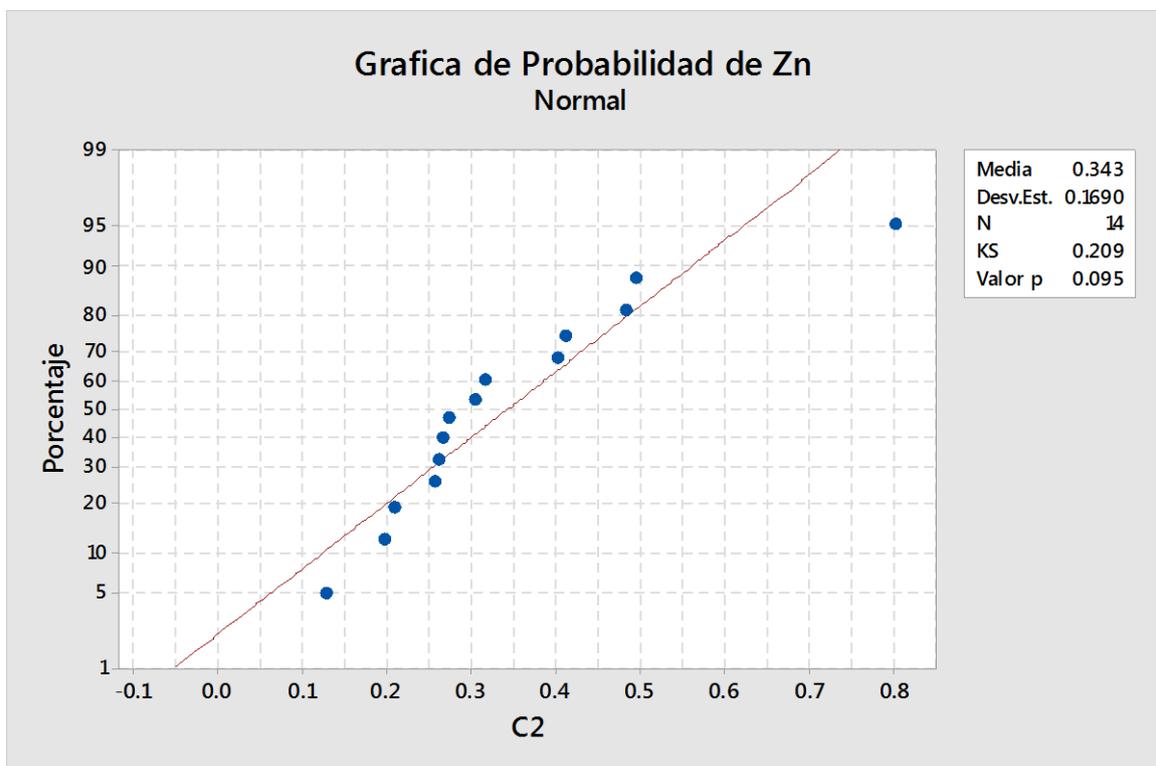
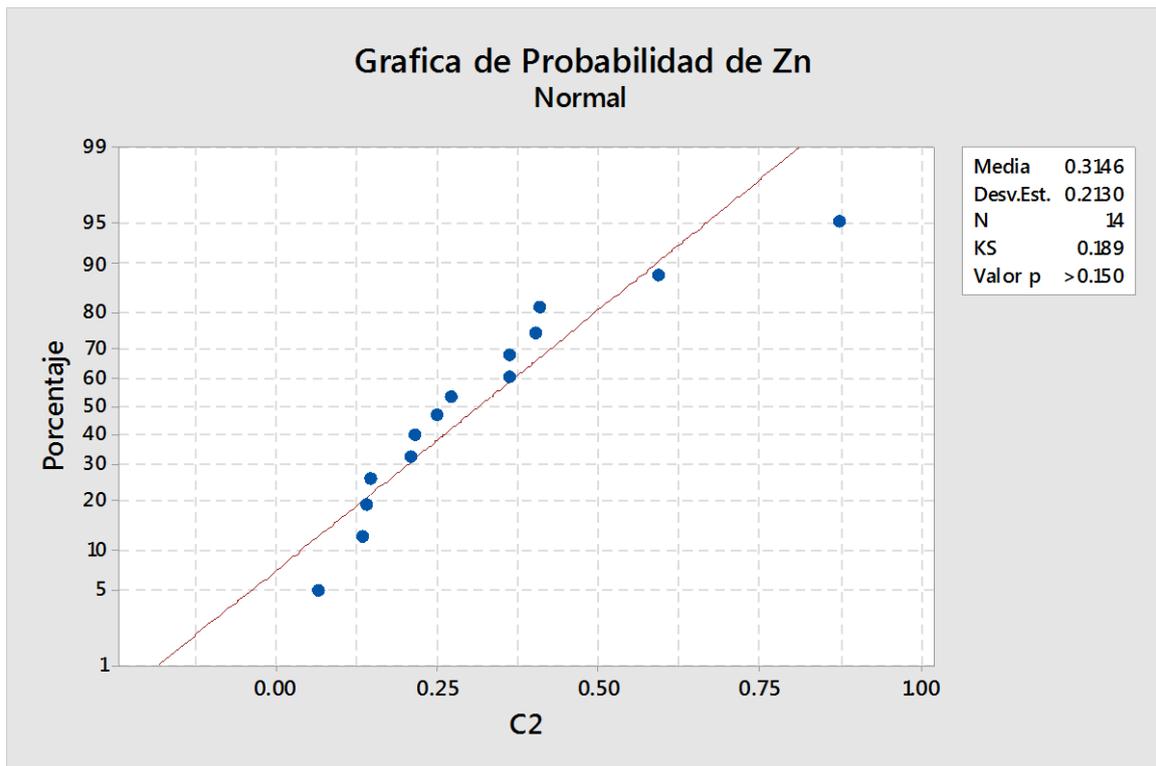
ANEXO N.º 22. Tabla de resultados de Zn durante 2 meses con los tres flujos diferentes en el humedal.

Zn(25ml/min)	Zn(30ml/min)	Zn(35ml/min)
0.15	0.59	0.21
0.3	0.4	0.256
0.11	0.36	0.315
0.026	0.14	0.483
0.014	0.871	0.494
0.052	0.36	0.401
0.006	0.407	0.198
0.15	0.27	0.274
0.23	0.063	0.8
0.25	0.132	0.412
0.014	0.145	0.265
0.058	0.207	0.26
0.36	0.247	0.305
0.18	0.213	0.129

C1	N	Media	Agrupación
C3	14	0.343	A
C2	14	0.3146	A
C1	14	0.1357	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*





Fuente.Propio.

ANEXO N.° 23. Tabla de Límites Máximos Permisibles para la descarga del efluente al medio ambiente.

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH	mg/L	6-9	6-9
Arsénico Total	mg/L	0.1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro(Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

Fuente. MINAM, 2010.