

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**“EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DEL  
HIERRO, MANGANESO Y SULFATOS CONTENIDOS EN UNA  
MUESTRA DE AGUAS ÁCIDAS, TRATADA MEDIANTE UN  
HUMEDAL DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL CON  
LA ESPECIE DRACAENA SANDERIANA COMO COMPONENTE  
VEGETATIVO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO SANITARIO**

ELABORADO POR:

**VÍCTOR JOAQUÍN VIZCARRA ARCE**

ASESOR:

ING. JUAN CARLOS ALARCÓN CÓNDOR

LIMA - PERÚ

2021

## **DEDICATORIA**

A mis padres por su paciencia y comprensión.

A mi tío Saúl Vizcarra por su apoyo incondicional en todo momento.

Al maestro Hernán Rado Cáceres y su vocación por el fascinante mundo de las matemáticas.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecer a Dios, porque con él se acabó el miedo, el vacío, la ansiedad, ahora sólo me queda admirar el orden divino, una fuerza e inteligencia superior, así como la diligencia para emprender y concluir cualquier proyecto.

A mis padres, por su apoyo y comprensión, les agradezco con todo mi corazón, ya que gracias a su ayuda incondicional he logrado salir adelante en los momentos más difíciles de la vida.

Deseo manifestar mi profunda gratitud y orgullo de haber pertenecido a la Universidad Nacional de Ingeniería, por la formación brindada todos estos años, lo cual fue esencial para poder desarrollar este informe de tesis y desempeñarme de la mejor manera posible como profesional.

Un agradecimiento a mi asesor de tesis, el Ing. Juan Carlos Alarcón Córdor, por haberme dado la oportunidad de recurrir a su experiencia y conocimientos acerca del tema, así como también por la orientación y sugerencias durante todo el desarrollo de la presente investigación.

## RESUMEN

El objetivo principal de la presente investigación, es determinar hasta qué grado de eficiencia en reducción de metales y sulfatos contenidos en una muestra de aguas ácidas, puede presentarse al elegir un tratamiento por medio de Humedales Artificiales de Flujo Sub Superficial elaborado con la especie *Dracaena Sanderiana* (también conocida como bambú de interiores) como componente vegetativo.

Para la construcción e instalación de los componentes del humedal artificial de flujo sub superficial, el cual consiste en un módulo de vidrio, dividido en 04 celdas o compartimentos, conteniendo cada uno la especie *Dracaena Sanderiana*, la cual promoverá las reacciones biológicas a nivel sub-superficial con la intención de mejorar así, la reducción de metales pesados y sulfatos presentes en la muestra.

El principio en el que se ha basado la investigación, consiste en observar la reducción de sulfatos como un indicador en la estabilización del medio ácido, logrando el incremento del pH, con lo cual, dicha actividad, conllevará a una disminución de la solubilidad de los metales contenidos en el agua, generando su reducción por precipitación.

Para fines prácticos de investigación, se ha generado una muestra sintética elaborada en base a reactivos como el sulfato de hierro y sulfato de manganeso. El motivo de la elección de ambos metales fue porque el hierro está presente en toda muestra de drenaje ácido de mina en diversas concentraciones, en cuanto al manganeso, este se ha considerado por ser el metal más difícil de remover, ya que presenta un alto potencial de solubilización en un amplio rango de pH, esto es, entre 4.5 – 8.0.

Finalmente, en los resultados obtenidos, se observa cómo se ha logrado la reducción total de la concentración del hierro contenido en las muestras, y la tendencia se ha mantenido a lo largo de los 02 meses de pruebas efectivas. A pesar de que se logró remover el hierro, la concentración de manganeso sólo disminuyó entre 44.01% y 86.61% para el mes de marzo y entre 38.75% y 61.32% para el mes de abril.

## ABSTRACT

The main objective of the present investigation, is to determine to what degree of efficiency in reduction of metals and sulphates contained in a sample of acidic waters, can be presented when choosing a treatment by means of Artificial Wetlands of Sub Surface Flow elaborated with the *Dracaena Sanderiana* species (also known as indoor bamboo) as a vegetative component.

For the construction and installation of the components of the artificial sub-surface flow wetland, which consists of a glass module, divided into 04 cells or compartments, each containing the *Dracaena Sanderiana* species, which will promote biological reactions at the sub-level with the intention of improving the reduction of heavy metals and sulfates present in the sample.

The principle on which the research has been based, consists in observing the reduction of sulfates as an indicator in the stabilization of the acidic medium, achieving the increase in pH, which, said activity, will lead to a decrease in the solubility of the metals contained in the water, generating its reduction by precipitation.

For practical research purposes, a synthetic sample has been generated based on reagents such as iron sulfate and manganese sulfate. The reason for the choice of both metals was because iron is present in any sample of acid mine drainage in various concentrations, in terms of manganese, this has been considered as the most difficult metal to remove, since it has a high potential of solubilization over a wide pH range, that is, between 4.5 - 8.0.

Finally, in the results obtained, it is observed how the total reduction of the concentration of the iron contained in the samples has been achieved, and the trend has been maintained throughout the 02 months of effective tests. Although the iron was removed, the concentration of manganese only decreased between 44.01% and 86.61% for the month of March and between 38.75% and 61.32% for the month of April.

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>DEDICATORIA</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTO</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>RESUMEN</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>8</b>  |
| 1.1 GENERALIDADES .....  | 8         |
| 1.2 ANTECEDENTES REFERENCIALES .....   | 9         |
| 1.2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....  | 9         |
| 1.2.2 ANTECEDENTES NACIONALES .....  | 11        |
| 1.3 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....                            | 13        |
| 1.4 OBJETIVOS.....   | 15        |
| 1.5 HIPÓTESIS.....   | 16        |
| <b>CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....                                   | <b>17</b> |
| 2.1 HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL HORIZONTAL .....               | 17        |
| 2.2 FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL .....       | 17        |
| 2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS POR MÉTODOS PASIVOS.....                       | 21        |
| 2.4 ELECCIÓN DE SUSTRATOS PARA UN HUMEDAL ARTIFICIAL .....                     | 23        |
| 2.4.1 Características de un sustrato adecuado para humedales artificiales..... | 24        |
| 2.5 COMPONENTE VEGETATIVO EN HUMEDALES ARTIFICIALES .....                      | 26        |
| 2.5.1 Tipos de vegetación comúnmente usadas en humedales artificiales.....     | 26        |
| 2.5.2 Mecanismos de adsorción de la vegetación .....                           | 28        |
| 2.6 PROCESOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES.....              | 29        |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.7 RENDIMIENTO DE UN HUMEDAL.....  | 30        |
| 2.8 CARACTERÍSTICAS DE UN DRENAJE ÁCIDO DE MINA .....   | 31        |
| 2.8.1 Proceso de formación de la pirita para la generación de acidez en el agua .....   | 31        |
| 2.9 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DESTINADO AL TRATAMIENTO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA.....                | 33        |
| 2.10 CRITERIOS CONSTRUCTIVOS PARA LA ELABORACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DESTINADO AL TRATAMIENTO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA ..... | 35        |
| 2.11 FUNDAMENTOS PARA LA SIMULACIÓN DE UNA MUESTRA DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS.....   | 38        |
| 2.11.1 Clasificación de drenajes mineros .....  | 38        |
| 2.11.2 Análisis del comportamiento que probablemente adopte cada uno de los componentes de la muestra.....                          | 41        |
| 2.11.3 Análisis del comportamiento que probablemente adopte la interacción entre los componentes de la muestra .....                | 43        |
| 2.12 CRITERIO DE SELECCIÓN DEL TIPO DE VEGETACIÓN QUE CONTENDRÁ EL HUMEDAL PROPUESTO .....  | 44        |
| <b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>  | <b>47</b> |
| 3.1 CONFIGURACIÓN Y ESQUEMA DEL HUMEDAL PROPUESTO .....   | 47        |
| 3.2 PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL..   | 53        |
| 3.2.1 Actos preliminares.....   | 53        |
| 3.2.2 Desempeño y adecuación del tipo de planta elegida.....  | 53        |
| 3.2.3 Elección del tiempo de retención.....   | 54        |
| <b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....</b>   | <b>55</b> |
| 4.1 PROCESO DE TRATAMIENTO Y TOMA DE MUESTRAS: MES DE MARZO.....  | 55        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2 PROCESO DE TRATAMIENTO Y TOMA DE MUESTRAS: MES DE ABRIL .....  | 70        |
| 4.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS:.....   | 83        |
| 4.3.1 GRÁFICOS QUE RELACIONA LA REDUCCIÓN DE METALES Y SULFATOS CON RESPECTO A LA TEMPERATURA PROMEDIO: MES DE MARZO.....  | 83        |
| 4.3.2 GRÁFICOS QUE RELACIONA LA REDUCCIÓN DE METALES Y SULFATOS CON RESPECTO A LA TEMPERATURA PROMEDIO: MES DE ABRIL ..... | 86        |
| 4.3.3 GRÁFICA QUE RELACIONA LA EFICIENCIA EN REDUCCIÓN DE FIERRO CON LAS ETAPAS DEL HUMEDAL EN LOS 02 MESES .....          | 89        |
| 4.3.4 GRÁFICA QUE RELACIONA LA EFICIENCIA EN REDUCCIÓN DE MANGANESO CON LAS ETAPAS DEL HUMEDAL EN LOS 02 MESES ...         | 90        |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>   | <b>91</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b>  | <b>93</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PRINCIPALES.....</b>   | <b>95</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARIAS.....</b>   | <b>96</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>  | <b>97</b> |
| ANEXO N° 01: PANEL FOTOGRÁFICO.....  | 97        |
| ANEXO N°02: CERTIFICADOS DE CALIDAD DE LOS REACTIVOS UTILIZADOS.....   | 105       |



## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 GENERALIDADES**

La idea de la biorremediación de drenajes ácidos por medio de humedales, es un método de tratamiento basado en la naturaleza misma, ya que a lo largo de muchos años se ha comprobado que en dichos humedales se purifica el agua, así nació la idea de recrearlos en menos tiempo que la misma naturaleza, estos humedales constan de organismos que pueden adaptarse a circunstancias extremas en este caso son plantas comunes de las zonas afectadas y bacterias sulfato reductoras, para la supervivencia de estos organismos se necesita del agua y de un sustrato adecuado. Muchas veces en la recreación de humedales se ha dispuesto de un geotextil para ayudar con la filtración del agua, cuyo proceso de tratamiento se encuentra en dos fases: una anaeróbica donde trabajan las bacterias sulfato - reductoras y una aeróbica donde se ubican las plantas. Al encontrarse el recurso hídrico con metales pesados y estar en contacto con el ambiente, éste se convierte en un drenaje ácido, el cual es perjudicial para la salud de pobladores de zonas aledañas que sólo cuentan con una fuente de agua, la cual no puede contener metales pesados disueltos, es decir, en forma soluble y esto es lo que lo hace tan peligroso, ya que puede ingresar al organismo de plantas, humanos y animales. Es entonces que trabajan las bacterias sulfato reductoras, como lo dice su nombre, estas reducen el sulfuro del drenaje ácido convirtiéndolo en un gas llamado sulfuro de hidrógeno, este gas al elevarse a la superficie del humedal tiene como propiedad atrapar a los metales pesados que están disueltos y convertirlos en insolubles, es decir, que se materialicen, como éstos tienen peso por estar ya en un estado sólido se precipitan a la base del humedal dejando así el recurso hídrico libre de ellos entonces el agua pierde acidez y su pH tiende a ser neutro, descontaminándose de metales pesados. Las plantas contribuyen con la biorremediación almacenando en sus raíces dichos metales ya insolubles y además colabora con el ecosistema del humedal, es así como se lleva a cabo la biorremediación de los drenajes ácidos generados por las actividades de extracción minera.

## 1.2 ANTECEDENTES REFERENCIALES

### 1.2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Desde hace más de 30 años en Europa y los Estados Unidos, muchos investigadores y organismos oficiales vienen desarrollando con buenos resultados el empleo de sistemas de tratamiento pasivo para drenajes ácidos de mina, tenemos a continuación algunas referencias:

1. Un informe elaborado en 1996 por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EEUU (EPA US), señala que entre junio de 1985 y agosto de 1987, la corporación estatal de los EEUU llamada Tennessee Valley Authority (TVA), creada por el Presidente Franklin D. Roosevelt, construyó en los estados de Alabama y Tennessee 14 humedales desarrollados por el Ingeniero Ambiental Gregory Brodie, para tratar drenajes ácidos procedentes de plantas mineras de carbón, consiguiendo incrementar el pH de 3,1 a 6,7 y una reducción para el Fe de 69 a 0,9 mg/l y para Mn de 9,3 a 1,8 mg/l.
2. Los sistemas de humedales diseñados y construidos por la empresa **Black & Veatch** de los EEUU en colaboración con el Ingeniero Jack R. Nawrot, han estado tratando el agua por más de 4 años; el sistema de tratamiento de humedales de la Villa Indian Creek (Florida) ha estado en operación por más de 2 años. Todos han sido muy exitosos en la disminución de la acidez y las concentraciones de metales en el agua, hasta el punto de que el humedal de Indian Creek ahora se utiliza como hábitat natural. Antes de la construcción de los humedales, Indian Creek estaba desprovisto de peces y su drenaje mataba a los peces a millas río abajo. El drenaje minero procedente en ambos sitios tenía un pH de 3 antes de que se construyeran los humedales, ahora es superior a 6. El contenido de hierro del drenaje de cada uno de estos sitios ha disminuido de más de 10 mg/L a menos de 1 mg/L.
3. Tratamiento pasivo de drenaje de mina en la Faja Pirítica Ibérica (FPI) - Provincia de Huelva, Comunidad de Andalucía, España, donde dos de sus principales ríos, el Tinto y el Odiel, presentan altos niveles de contaminación

por drenajes ácidos de minas, obteniéndose remociones de hasta el 100 % en metales como Cd, Pb, Zn, Al, Cu, estudio elaborado en agosto del 2009, por Francisco Macías Suárez, Manuel A. Caraballo Monge y José Miguel Nieto Liñán del Departamento de Geología de la Universidad de Huelva, cuyo estudio fue financiado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

4. Entre 1990 y 1993 en la Columbia Británica de Canadá, la empresa minera Bell Copper Corp. construyó dos humedales anaerobios experimentales para tratar las aguas ácidas de la mina de cobre Bell Mine, la cual cesó sus actividades en 1992. En los dos sistemas se incrementó el pH desde 3 hasta 6-8 y se lograron reducciones del 40% y del 80 % de Cu con un tiempo de retención de 12 y 23 días respectivamente. El rendimiento mejoraba al incrementarse el tiempo de retención y disminuía al descender la temperatura como reflejo de una menor actividad biológica.
5. En febrero de 1995, la Agencia Ambiental de Inglaterra en colaboración con la Universidad de Newcastle Upon Tyne, desarrolló y construyó en la villa de Quaking Houses, Condado de Durham en Inglaterra, el primer humedal anaerobio de Europa, con un área de 45 m<sup>2</sup> y un periodo de diseño de 25 años, destinado a remediar la contaminación del arroyo Stanley Burn, consiguiéndose reducir en un 70 % la acidez del agua, en un 65 % el contenido de Fe y en un 75% el contenido de Al.
6. En abril de 1995 se diseñó y construyó un sistema de tratamiento pasivo con diferentes tipos de sustratos y diferentes tipos de vegetación como la Typha y el Juncus, en el Valle del Rio Pelenna en Gales, Reino Unido, el cual contenía importantes concentraciones de hierro aportadas por las actividades de extracción mineras en las minas Whitworth y Garth Tonmawr, en el que se logró eliminar entre un 72-99% de Fe y obtener un pH neutro, con un tiempo de retención en el sistema de 14 horas.

7. En junio de 1998, en la mina de níquel Storgangen ubicada al sur de Noruega, se construyó a escala piloto un sistema de humedales de flujo subsuperficial para tratar los drenajes ácidos de sus residuos. Para un caudal de 35 l/min y un tiempo de retención de 10 horas se eliminaba cerca del 98% de Ni, observándose en invierno una disminución en la reducción de Ni de 35 a 71% y en verano un incremento de 64 a 99%. También se consiguieron buenos resultados en la eliminación de Al (96%), Cu (98%), Cd (98%), Zn (99%) y Cr (64%), (David C. Ettner).

### **1.2.2 ANTECEDENTES NACIONALES**

En el Perú la presentación de material o tesis universitarias sobre el tratamiento pasivo de aguas ácidas es muy reducida, en nuestra alma mater tenemos algunas investigaciones:

1. Ing. Elfri Ruth Inga Blancas, presenta "Tratamiento de Efluentes por el Método de Pantanos Artificiales (Wetland)" lo cual es una tesis para optar el grado académico de maestro en ciencias. La tesis se centra en un caso de estudio particular de la Mina Comarsa, que se encuentra realizando trabajos de cierre mina progresivo. La predicción de la calidad de sus aguas, así como una previsión de posibles métodos de tratamiento que pudieran llevarse a cabo en caso de ser necesarios, conforma el motivo principal de esta tesis. Se propone la aplicación de diversas técnicas existentes para el tratamiento de las aguas ácidas de mina, apoyadas sobre todo en métodos pasivos e indicando en cada caso los materiales y requisitos necesarios para su aplicación. (UNI - Lima, Perú 2011).
2. Los Sres. Bachilleres Renato Carlo Villanueva Álvarez y Fernando Rodrigo Sánchez Pinto, presentan la tesis para optar el título profesional de ingeniero sanitario: "Diseño de Tratamiento Pasivo Después del Plan de Cierre de Mina" el cual es un estudio realizado en la Mina Julcani, ubicada en el distrito de Santiago Apóstol de Ccochaccasa, provincia de Angaraes, departamento de Huancavelica a 64 Km. al sur este de Huancavelica. Dicha investigación

evalúa el tratamiento pasivo para la neutralización de las aguas ácidas mediante los drenes de caliza, determinando la tasa de tratamiento de agua ácida por medio de trabajos experimentales de campo y laboratorio, teniendo en cuenta las diferentes modificaciones durante la etapa de diseño y monitoreo de variables como dimensionamiento del canal, caudal de diseño (Q), perímetro mojado (PM), radio hidráulico (R), tirante (y), caudal por Manning (Q'), potencial de hidrógeno (pH), tiempo de contacto (Tc), volumen de agua tratada (Vt), pendiente (S), velocidad para finalmente determinar la tasa de Tasa de Tratamiento de (Ta) en litros/m<sup>2</sup>/s. (UNI - Lima, Perú 2013)

3. El Señor Bachiller Diego Rolando Andoa Llallico, presenta la tesis para optar el título profesional de ingeniero sanitario: "Remoción de metales pesados como zinc (Zn), cadmio (Cd) y plomo (Pb) a través de humedal artificial de flujo sub-superficial para agua de consumo humano", el propósito de este trabajo de investigación fue determinar la eficacia de un Humedal Artificial de Flujo Sub Superficial (HAFSS) con macrófitas como medio vegetal para la depuración de los metales pesados (Zinc, Cadmio y Plomo) presentes en agua de consumo humano. Las plantas logran subsistir y depurar el agua con una eficacia de 87.69%, 86.64% y 93.55% para el Zinc, Cadmio y Plomo respectivamente. (UNI - Lima, Perú 2018)

### **1.3 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

Es sabido que los drenajes ácidos provenientes de las actividades de extracción minera son una de las problemáticas más frecuentes en materia de contaminación de fuentes de agua superficiales como subterráneas, este daño puede resultar irreversible para las vegetaciones y animales, además, puede perdurar durante cientos, inclusive miles de años. Por ejemplo, el hierro y manganeso al oxidarse, se precipitan generando un color rojizo-oscuro que provoca el rechazo de los consumidores, manchas en la ropa, obstruyen tuberías, accesorios y bombas, reducen la capacidad hidráulica de las redes, generando altos costos en su operación y mantenimiento. A su vez, las concentraciones elevadas de hierro y manganeso pueden acelerar el crecimiento biológico en los sistemas de distribución y contribuir a los problemas de sabor y olor en el agua. Para mitigar dicho impacto, las empresas mineras tienen la obligación de investigar sobre métodos de tratamiento eficientes, de bajo costo, de simple operación y mantenimiento y con buen sustento técnico, económico y social. En el Perú ha ido creciendo el interés por el estudio y análisis de los conflictos sociales, así como por el desarrollo de propuestas adecuadas para poder afrontarlos. De esta manera, han surgido múltiples iniciativas desde el Estado y las poblaciones, desarrollando así, una mayor conciencia sobre la necesidad de promover estrategias y metodologías apropiadas para la prevención y tratamiento de conflictos sociales. De esta manera lograremos mejorar la imagen de la empresa minera ante las comunidades aledañas, cuyos pobladores se muestran frecuentemente sensibilizados en cuanto al impacto generado por dicha actividad en los recursos hídricos.

**Potenciales Beneficiarios:**

Como principales beneficiarios tendremos a los pobladores de zonas aledañas a los yacimientos mineros que están siendo explotados por la empresa minera, ya que estos tienen como principal fuente de abastecimiento de agua para consumo y riego a los medios subterráneos y/o superficiales donde se evacúan dichos drenajes, evitándose así, su contaminación producto de las actividades de extracción.

A nivel del estado, el sector minero ha sido siempre uno de los pilares fundamentales de su economía, es por este motivo que considero la presente investigación como un aporte en el desarrollo de capacidades para afrontar de manera exitosa los conflictos sociales, mejorando el control y regulación, social y ambiental de la actividad minera por parte del estado peruano. Desde el año 2000, con el retorno de la democracia en nuestro país ha ido creciendo notablemente el interés por estos temas, y de esta manera, han surgido diversas iniciativas desde el estado, al igual que desde las organizaciones de nuestra sociedad civil. Es así que con este tipo de investigaciones se estará generando una mayor conciencia sobre la necesidad de promover estrategias y metodologías apropiadas para la prevención y tratamiento de drenajes ácidos mineros.

## 1.4 OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL:

- ✓ Determinar el máximo grado de eficiencia en la reducción de concentración de metales y sulfatos que puede generarse al tratar una muestra de aguas ácidas, por medio de un Humedal Artificial de Flujo Sub Superficial elaborado con la especie *Dracaena Sanderiana* como componente vegetativo.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ✓ Observar el grado de reducción de Metales y Sulfatos que puede brindar un Humedal Artificial con la especie *Dracaena Sanderiana*.
- ✓ Proponer un esquema o configuración adecuada de tratamiento reduciendo las zonas muertas en el humedal, tomando en cuenta la influencia del clima, temperatura y grado de humedad de la zona, procurando que este sea de bajo costo constructivo, operativo y de mantenimiento.
- ✓ Demostrar que un Humedal Artificial de Flujo Sub Superficial con la especie *Dracaena Sanderiana* podría ser empleado como una alternativa adecuada para la reducción de contaminantes provenientes de un efluente minero.



## 1.5 HIPÓTESIS

### ✓ HIPÓTESIS GENERAL

Un tratamiento de tipo pasivo con un humedal artificial de flujo sub superficial horizontal puede generar un buen porcentaje de eficiencia en la reducción de concentración de hierro, manganeso y sulfatos contenidos en una muestra artificial que simule un agua ácida.

### ✓ HIPÓTESIS ESPECÍFICA

Con un tratamiento de tipo pasivo usando la especie *Dracaena Sanderiana* y una configuración adecuada de las celdas del humedal, se puede obtener una eficiencia favorable en cuanto a reducción de concentración de metales y sulfatos contenidos en una muestra de aguas ácidas.

## **CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **2.1 HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL HORIZONTAL**

Una de las alternativas de tratamiento más consideradas, en la remoción de Metales Pesados, es el Humedal de Flujo Sub Superficial Horizontal, dichos humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración lo suficiente para mantener tales condiciones. La circulación del agua es subterránea a través de un medio granular y suele tener una profundidad de entre 0.50 a 1.00 m con plantas emergentes. La utilización de plantas acuáticas ha demostrado ser eficiente en la remoción de una amplia gama de sustancias orgánicas, así como nutrientes y metales pesados.

Las plantas acuáticas constituyen la base de la tecnología de los humedales, estas tienen la propiedad de inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces. El aire que no es aprovechado por la especie y que esta expelle es absorbido por microorganismos como bacterias y hongos que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema (Novotny and Olem, 1994).

### **2.2 FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL**

Como preámbulo, es preciso considerar que, para realizar una estimación adecuada de la capacidad de remoción de contaminantes en un sistema de tratamiento, es recomendable que dicho sistema contenga una concentración excesiva de dicho contaminante. La eliminación de contaminantes presentes podría ser indicador de un sistema efectivo, pero no puede proveer una estimación de la capacidad de los procesos de eliminación, puesto que la proporción de eliminación de contaminante puede estar limitada simplemente por la proporción de carga de contaminante. Solamente cuando el humedal está sobrecargado con un determinado metal, por ejemplo, puede ser evaluada la capacidad de eliminación de dicho metal en el humedal. Otras variables a tener en cuenta son hidráulicas, termodinámicas (cinética del proceso de eliminación) y los niveles de entrada y salida del contaminante.

El diseño de un humedal artificial está basado en el principio de reactores de adherencia y crecimiento bacteriano, es por eso que el fundamento de su desempeño está dado por una ecuación cinética de primer orden para flujos en pistón. El cálculo de la tasa de eliminación se suele interpretar como vemos a continuación:

$$C_t = C_0 \cdot \exp(-k_t \cdot t)$$

Donde:

$C_t$  = Concentración del contaminante estudiado a la salida del humedal (mg/l).

$C_0$  = Concentración del contaminante estudiado al ingreso del humedal (mg/l).

$K_t$  = Constante de velocidad de reacción de primer orden, la cual es función de la temperatura (días<sup>-1</sup>).

$t$  = tiempo de retención en el humedal (días)

Simulación para la ecuación cinética del ion As (prueba en botella)

$$C_t/C_0 = \exp[-k_t t]$$

$$\ln C_t = \ln C_0 - (k_t)(t)$$

$$k_t = (1/t)(\ln (C_0/C_t))$$

Tabla N° 1.0.- Correlación lineal de primer orden para el ion As

| $C_{As}$ (mg/l) | Tiempo (hr) | $\ln C_t$ |
|-----------------|-------------|-----------|
| 15              | 0.0         | 2.7081    |
| 10              | 1.0         | 2.3026    |
| 8               | 1.6         | 2.0794    |
| 6               | 2.0         | 1.7918    |
| 5               | 2.5         | 1.6094    |
| 4               | 3.0         | 1.3863    |
| 3               | 4.0         | 1.0986    |
| 0.5             | 8.0         | -0.6931   |

$$K_t = 0.423$$

$$C_0 = 14.846$$

$$C_t = C$$

$$r^2 = 0.9975$$

$$C = 14.85 \cdot \exp(-0.423t)$$

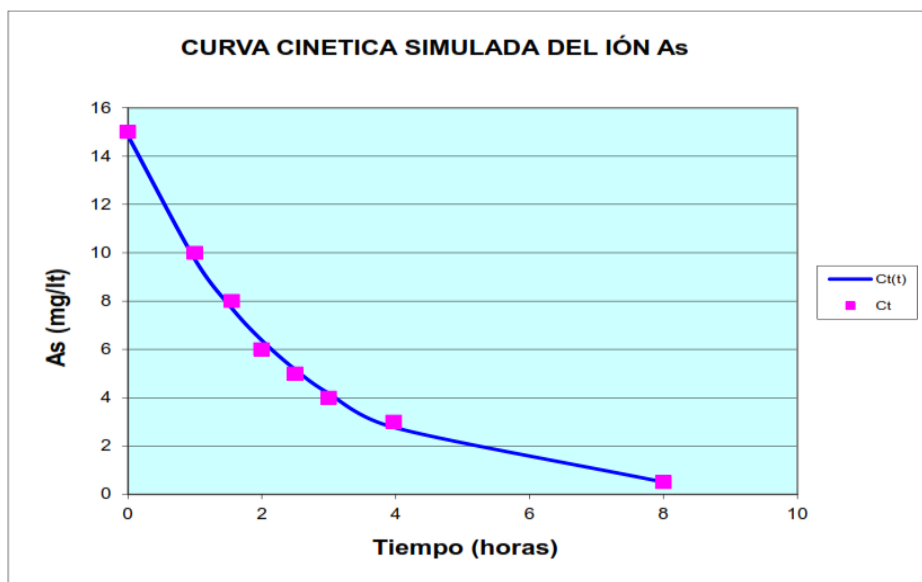


Fig. N°1.0 - Curva cinética para el ion As, obtenido en pruebas de botella

Como se puede observar en la curva de arriba, cuando el tiempo de retención hidráulica aumenta, las concentraciones de los efluentes con contaminantes biodegradables disminuyen, por consiguiente, el tiempo de retención hidráulica es un variable importante de diseño y control operacional. El tiempo de retención hidráulico está definido como:

$$T = \frac{L W n d}{Q}$$

Donde:

- L = Largo del sistema (m).
- W = Ancho del Sistema (m).
- n = Porosidad el lecho, cama o celda (%)
- d = Profundidad sumergible (m)
- Q = Flujo promedio a través del humedal (m<sup>3</sup>/día)

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Donde:

- V<sub>v</sub> = Volumen de vacío o poros (\*).
- V = Volumen total del sistema.

(\*) En un sistema de humedales de flujo superficial V<sub>v</sub> es prácticamente el volumen no ocupado por la vegetación, este varía con el tipo de densidad de vegetación viva o muerta.

**Fuente:** Constructed Wetland Systems: Design Approaches - Scott D. Wallace

### **2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS POR MÉTODOS PASIVOS**

Es de conocimiento general que los sistemas pasivos actúan con mayor eficacia en el tratamiento de pequeños caudales, siendo necesario para el diseño y configuración del humedal, la disponibilidad de grandes áreas de terreno que aseguren la buena circulación y distribución del efluente dentro del dispositivo, de esta manera se maximiza el tiempo de contacto del efluente contaminado con el sustrato y la vegetación.

Los métodos de tratamiento convencional de aguas ácidas tienen costos elevados, que no pueden ser solventados por largos periodos. La principal ventaja de los tratamientos pasivos radica en los bajos costos de inversión en ejecución y mantenimiento. Finalizado el proceso de explotación minera, se debería optar por la aplicación de métodos de tratamiento tales como sistemas pasivos, los cuales se caracterizan principalmente por regular la acidez, incentivar la precipitación de metales pesados y remover la mayoría de elementos contaminantes.

Al ser captados los drenajes residuales, y antes de elegir una alternativa de tratamiento, se debe proceder con la caracterización fisicoquímica de estas aguas, teniendo en cuenta parámetros como pH, conductividad, oxígeno disuelto, tipo de metales contenidos y su concentración. Debemos tomar en cuenta los eventos hidrológicos locales, así como las variaciones de clima y temperatura. A continuación, se describen los principales aspectos a tener en cuenta para el desarrollo de un sistema pasivo:

- ✓ Características del agua ácida a tratar y su grado de pre-tratamiento.
- ✓ Área mínima o superficie requerida.
- ✓ La forma del terreno disponible y/o seleccionado, lo cual determinara la geometría del dispositivo.
- ✓ Relación largo/ancho.
- ✓ Profundidad de las celdas.

- ✓ Necesidad de efectuar excavación, nivelación y explanación en el terreno a fin de obtener a fin de obtener una adecuada pendiente y profundidad en las celdas del humedal.
- ✓ Tiempo de retención hidráulica.
- ✓ Composición de los sustratos.

Cabe resaltar que, para un sistema de humedales destinados al tratamiento de drenajes ácidos de mina, el tipo de diseño básico es el de flujo superficial, el cual consiste en una o múltiples celdas donde el efluente ácido de mina fluctúa lentamente sobre una vegetación que utiliza los nutrientes.

Los factores más importantes que influyen en la configuración de un sistema de humedales son: velocidad de flujo, fluctuaciones de caudal, tiempo de retención, circulación y distribución del agua. Por último, la configuración adoptada para el humedal debería fomentar la adecuada distribución de las aguas ácidas de mina, minimizando así, el efecto de cortocircuito entre las celdas que contienen los sustratos.

## 2.4 ELECCIÓN DE SUSTRATOS PARA UN HUMEDAL ARTIFICIAL

Se conoce como sustrato al medio sólido e inerte, que protege y da soporte a la planta para el desarrollo de sus raíces, permitiendo que una gran cantidad de nutrientes se encuentre disponible para su desarrollo.

La selección de un sustrato se basa en los requerimientos del tratamiento, lo cual determinará su costo. Estos sustratos pueden ser suelos naturales, suelos mixtos y combinaciones de varios tipos. El tipo de sustrato va a influir sobre la concentración de sólidos en suspensión, remoción orgánica y degradación biológica de microorganismos.

El sustrato tendrá influencia en la capacidad de tratamiento, apoyará a la vegetación, generará un mecanismo de adherencia para los microorganismos presentes y va a favorecer a la remoción de metales a través de intercambio iónico y adsorción sobre sustancias húmicas, fúlvicas y partículas de arcilla. Las interfaces sustrato – agua y sustrato – raíz son críticos para el desarrollo de mecanismos de tratamiento aeróbico – anaeróbico.

Los suelos orgánicos remueven fácilmente iones metálicos a través de intercambio iónico. Los sustratos, suelo y grava suministran lo siguiente:

- ✓ Lecho de soporte para la vegetación.
- ✓ Considerable área superficial para la formación de reacciones de iones, aniones y otros compuestos.
- ✓ Superficies de adherencia para la población microbiana.

Las condiciones a las que son sometidas un drenaje ácido de mina por medio de un sustrato orgánico son:

- ✓ Promover una zona anaeróbica generadora del  $H_2S$ , lo cual disminuirá la concentración de sulfatos en dicho efluente, y favorecerá el incremento del pH.
- ✓ Incentivar el crecimiento de la vegetación.
- ✓ Incremento de la población bacteriana, lo cual elevará el pH del medio.



#### **2.4.1 Características de un sustrato adecuado para humedales artificiales**

Los sustratos son considerados como elementos de gran importancia en el desarrollo de humedales, pero estos a su vez deben reunir una serie de características favorables para nuestro tratamiento. Sin embargo, no siempre un sustrato reúne todas las características deseables; por ello es que recurrimos a realizar mezclas de los mismos, buscando que unos aporten lo que les falta a otros. A continuación, se mencionan las propiedades que debe reunir un sustrato adecuado:

##### **Retención de humedad**

Un sustrato con buena retención de humedad, determina la posibilidad de que la planta tenga a disposición los nutrientes necesarios para que esta pueda realizar sus procesos metabólicos respectivos como fotosíntesis, transpiración, respiración y procesos reproductivos. La retención de humedad va de la mano con la granulometría del material (tamaño de partículas) y porosidad (espacio que hay entre partículas). Mientras más elevada sea la capacidad de retención de agua del sustrato, menos frecuentes serán los riegos.

##### **La capilaridad**

Esta es la capacidad de absorber y distribuir en todas las direcciones los nutrientes a través de las porosidades. Esto es importante, sobre todo cuando se utiliza un sistema de riego por goteo, en el cual se necesita que el agua se distribuya horizontalmente a partir del punto de ingreso al humedal.

Un sustrato sin esta propiedad, hace que los nutrientes se muevan verticalmente a través del perfil del mismo, llegando rápidamente al drenaje y dejando zonas muertas en las cuales no se puede desarrollar las raíces haciendo que la planta o no crezca adecuadamente o no se desarrolle bien. Cuando el sustrato tiene una buena capilaridad, el agua es absorbida en todas direcciones, haciendo que las raíces de las plantas encuentren humedad a lo largo del humedal, debido a la homogeneidad en la distribución del agua.

### **Capacidad de aireación en la raíz**

El nivel de capacidad de aireación óptimo varía entre un 20% y un 30%, esto se define como la proporción del volumen de oxígeno que se encuentra en el sustrato, después de haber sido saturado de agua y terminado de drenar.

### **Estabilidad física**

La compactación y descomposición del sustrato puede causar una reducción en el espacio poroso y en la capacidad de aireación a lo largo de la vegetación. Es por ello que la estabilidad de las propiedades físicas es de vital importancia en humedales de larga duración. Los sustratos menos recomendables son aquellos que pierden estabilidad fácilmente con la acción del agua.

### **Químicamente inerte**

Esto significa que no debe suministrar ningún elemento que pueda reaccionar con algún elemento químico presente en el efluente de mina.

### **Biológicamente inerte**

El sustrato debe ser un medio carente de actividad biológica; en este sentido, cualquier presencia de microorganismos o insectos sería contraproducente ya que puede causar daños, infecciones o enfermedades a nuestra vegetación.

## **2.5 COMPONENTE VEGETATIVO EN HUMEDALES ARTIFICIALES**

En el desarrollo de un sistema de humedales, la elección del componente vegetativo es un factor muy importante. La vegetación seleccionada debería tener las siguientes características:

- ✓ Poseer activos colonizadores vegetativos, es decir, permitir el ingreso de nuevas colonias de microorganismos.
- ✓ Poseer un amplio sistema de rizomas.
- ✓ Poseer una alta densidad de tallos para obtener una adecuada asimilación de nutrientes.
- ✓ Ofrecer una considerable biomasa para la población microbiana.
- ✓ Asegurar un eficiente transporte de oxígeno hacia la zona anaeróbica de las raíces para facilitar la oxidación de metales.

En un humedal en operación, factores como el clima, hidrología y altura influyen en la selección de especies de plantas. En cualquier caso, es deseable una combinación de plantas flotantes, emergentes y sub-emergentes, especialmente aquellas con hojas densas y tallos sumergidos.

### **2.5.1 Tipos de vegetación comúnmente usadas en humedales artificiales**

Las plantas comúnmente utilizadas en el desarrollo de humedales artificiales son del tipo hidrófitas emergentes, las cuales son plantas acuáticas adaptadas a vivir parcialmente en el aire y en el agua, presentando tallos, hojas y un sistema de raíces que normalmente permanece sumergido. Del amplio rango de plantas acuáticas que pueden ser utilizadas para estos casos, tenemos las siguientes: la Reed bed conocida como lecho de caña, *Phragmites australis* conocida comúnmente como el carrizo, *Scirpus lacustris* o junco de laguna y las diferentes variedades de *Typha* como *Latifolia*, *Glauca* o *Angustifolia* que, en muchos casos, poseen buenas tolerancias a determinadas concentraciones y tipos de contaminantes.

Las dos especies principales que se utilizan en el tratamiento de drenajes ácidos de mina en humedales, son la *Typha* y el *Sphagnum*. Ambas especies son características de ser tolerantes al ácido y de ser resistentes a diversas condiciones climáticas y de temperatura.

La Typha es fácil de propagar, puede producir una gran biomasa, y crecer en aguas con concentraciones de hierro de hasta 100 mg/l, y su densidad suele ser de 10 plantas/m<sup>2</sup>. Esta versatilidad y resistencia, junto con su capacidad de fijar el hierro y el manganeso por adsorción, la hacen una excelente opción vegetativa para la biorremediación del drenaje de ácido de mina en humedales artificiales.

Los estudios con Sphagnum han demostrado resultados favorables en cuanto a eliminación de metales y aumento del pH (Witthar, 1993). Sin embargo, el Sphagnum es conocido por su poca estabilidad y resistencia (Kadlec, 2000), estas características hacen que su uso en proyectos sea menos viable que el de la Typha, y además "es susceptible a la acumulación de hierro tóxico, y variaciones en pH, sedimentos, clima, química del agua, profundidad, y flujos" (Witthar, 1993). Lo mencionado anteriormente no debe ser motivo para omitirla en investigaciones acerca del tratamiento de drenajes ácidos mineros, ya que el desarrollo de nuevas técnicas podría comprobar su eficacia.

Otras plantas utilizadas en la construcción de sistemas de humedales incluyen la lámina de cama (reed bed), que ha mostrado buen funcionamiento en tratamiento de aguas ácidas, reduciendo la concentración de hierro y manganeso y aumentando el pH.

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 representan un sistema de filtración muy eficaz para el tratamiento de elementos tóxicos y aguas residuales de origen industrial y doméstico.

Las plantas acuáticas pueden ser compradas en un vivero, también pueden ser obtenidas de lagos, ríos y/o pantanos o ser desarrolladas para un proyecto específico.

Las plantas acuáticas tienen una capacidad excepcional para extraer minerales, estas pueden utilizarse en el tratamiento de tóxicos, desechos químicos, metales pesados y desechos orgánicos, también sirven como un gran indicador de polución a través de lo cual es posible determinar la presencia de sustancias

tóxicas tales como metales pesados e inclusive detectar la contaminación térmica que resulta de procesos naturales a través de cambios en la composición de las especies de comunidades de plantas acuáticas, de mortalidad repentina o desaparición paulatina de ciertas especies o por medio del análisis directo de tejidos de las plantas.

Hay plantas acuáticas que se utilizan exclusivamente para la remoción de metales pesados. Entre ellas figuran: variedades de musgos, espadañas, aneas, lentejas acuáticas, berros, jacintos de agua, junco, carrizo, cola de caballo, caña, algas, totora, cola de tiburón, lirios. Es esencial la selección de especies acuáticas adecuadas para clima frío.

### **2.5.2 Mecanismos de adsorción de la vegetación**

Al comienzo del proceso la mayoría de metales pesados se concentran en las raíces, luego pasan a los tallos y hojas, la capacidad de la biomasa de las plantas es adsorber metales pesados, esto presenta un comportamiento similar al de un carbón activado.

La vegetación proporciona, además de llevar a cabo la transferencia de oxígeno a través de sus raíces y rizomas, un medio bajo la superficie del agua para el desarrollo de microorganismos, los cuales llevarán a cabo el tratamiento biológico en el humedal. Por otro lado, estabilizará el sustrato, y dependiendo de la especie vegetativa, mejorará el impacto visual que pueda generar en el medio ambiente.

## 2.6 PROCESOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES

Un sistema de humedales artificiales puede reducir considerablemente la carga de contaminantes como los Sólidos Totales Suspendidos (STS), Nitrógeno, Fósforo, Metales Pesados y Materia Orgánica. La reducción de dichas concentraciones se puede dar por diferentes procesos o mecanismos como, por ejemplo:

- ✓ Procesos de adsorción e intercambio iónico.
- ✓ Asimilación de nutrientes y adsorción de metales por la vegetación.
- ✓ Filtración.
- ✓ Transformación biológica:
  - Oxidación de metales pesados por medio de bacterias.
  - Reducción de la concentración de sulfatos.
  - Desnitrificación.
- ✓ Reacciones de oxidación-reducción.
- ✓ En la zona de reducción participan activamente las bacterias reductoras de sulfatos y las bacterias reductoras de metales pesados.
- ✓ El proceso de oxidación se efectúa a través del sector de plantas acuáticas, donde la vegetación actúa como filtro absorbiendo metales pesados y al mismo tiempo reforzando al proceso de oxidación.
- ✓ La zona anaeróbica del humedal favorece la supresión de la acidez del efluente y la remoción de los metales, ya que la reducción del sulfato en la zona anaeróbica aumentará el pH, y bajo esas condiciones la solubilidad de los metales en el agua disminuye, lo cual genera su precipitación.
- ✓ La generación de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), favorece el precipitado de metales finos y coloides presentes en el agua ácida.
- ✓ El consumo de iones hidrógeno ( $H^+$ ) favorece el aumento del pH.

## 2.7 RENDIMIENTO DE UN HUMEDAL

Se han empleado diversos métodos para expresar el rendimiento de un humedal en la remoción de contaminantes, pero en el presente informe de investigación, se ha optado por utilizar la expresión de la reducción porcentual de concentración de metales a la salida del humedal en relación a su concentración en el ingreso a este ( $[(C_{in}-C_{out})/C_{in}] \times 100\%$ ), la cual se usa tradicionalmente. Esta forma para estimar la eficiencia del tratamiento, (la cual siempre se ha empleado, inclusive en trabajos especializados) tiene la desventaja de ser relativa, es decir, no tiene en cuenta el caudal de ingreso y, por tanto, no se aprecia la carga contaminante eliminada, razón por la cual esta expresión no puede ser utilizada como criterio en el dimensionamiento de un humedal.

Para evitar esta limitación es preferible expresar el rendimiento del humedal como la concentración de contaminante retenido por unidad de superficie en el tiempo, lo cual es denominado "eliminación por área" y relaciona las variables concentración, caudal y superficie del humedal. Dicha forma nos da la información directa para el dimensionamiento del humedal.

También se suele relacionar exponencialmente la "eliminación de primer orden" con la relación de eficiencia del tratamiento dada por la siguiente expresión:

$$(C_{in} - C_{out})/C_{in} = 1 - e^{(-K_1 A/Q)}$$

El tiempo de retención teórico (t) en el humedal, es definido así:

$$t = V/Q$$

Donde Q es el caudal medio que fluye a través del humedal  $(Q_{in}+Q_{out} / 2)$  y V es el volumen efectivo del humedal, que a su vez es definido como:

$$V = A \cdot h \cdot p$$

Donde A es el área superficial del humedal, h es el nivel superficial del agua y p la porosidad del medio definido como sustrato.

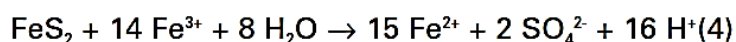
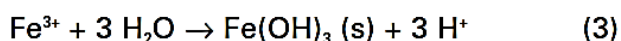
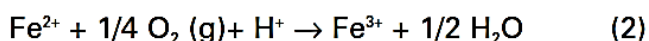
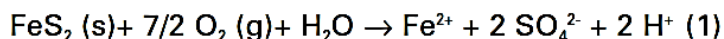
## 2.8 CARACTERÍSTICAS DE UN DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Se puede describir un drenaje ácido de mina como el agua contaminada por causa de las actividades de extracción minera, ya sea en forma superficial o profunda, poseen una alta acidez, alto contenido en sulfatos y con niveles elevados de metales disueltos, principalmente hierro, manganeso y aluminio. El drenaje ácido de mina tiene un color característico de ocre amarillento, esto es, debido a la gran cantidad de hierro oxidado.

En general, las concentraciones medidas del drenaje ácido de mina se pueden extender a partir de 50 a 300 mgFe/L, 20 a 30 mgMn/L, 20 a 2000 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L, y 3.0 a 5.5 unidades estándares del pH.

### 2.8.1 Proceso de formación de la pirita para la generación de acidez en el agua

Los investigadores Nordstrom y Alpers (1999) describen el proceso de oxidación de la pirita como el principal responsable de la formación de aguas ácidas. La pirita (FeS<sub>2</sub>) es el sulfuro más común en la naturaleza, y como tal, es estable y muy insoluble bajo las condiciones que brinda el subsuelo. Pero la exposición de estos minerales a condiciones atmosféricas, a través del proceso de extracción minera, desestabiliza su estructura mediante reacciones de oxidación. El agente oxidante para que se produzca este proceso puede ser el oxígeno (O<sub>2</sub>) o el hierro férrico (Fe<sup>3+</sup>). Las reacciones que intervienen en la oxidación de la pirita pueden ser representadas por las siguientes cuatro ecuaciones (Skousen et al., 1998; Nordstrom y Alpers, 1999; Mills, 1999; USEPA, 1996 y 2000; entre otros).



**Reacción (1):** Como se observa en esta reacción cuando la pirita entra en contacto con la atmósfera y el agua se produce la oxidación de esta, lo que produce Fe<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e H<sup>+</sup>, es decir se produce el ion ferroso, se liberan sulfatos y



se produce acidez, junto con otros elementos como As, Cd, Co, Ni, Pb, etc. Estos en menor proporción, forman parte de la pirita, podemos afirmar que la disponibilidad de oxígeno es esencial para la oxidación de sulfuros.

**Reacción (2):** Si el ambiente es favorable con el proceso de oxidación, entonces muchos iones ferrosos se oxidarán a iones férricos.

**Reacción (3):** Por lo general, por encima de un pH alrededor de 3, el ion férrico formado precipita mediante hidrólisis como hidróxido, disminuyendo por tanto el  $Fe^{3+}$  en solución, mientras que, a su vez, el pH baja simultáneamente.

**Reacción (4):** Por último, algunos cationes férricos ( $Fe^{3+}$ ) que se mantienen en solución, pueden seguir oxidando a la pirita para formar  $Fe^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $H^+$ .

En síntesis, la oxidación de la pirita (1) inicialmente es un proceso lento, que acaba con el hierro liberado y precipitado como hidróxido (3), al ser todavía relativamente alto el pH. Progresivamente la capacidad neutralizadora del medio va disminuyendo, y al alcanzar el pH el valor de 3,5 ya deja de formarse el hidróxido y la actividad del Fe en solución se incrementa.

Con dicho valor de pH las bacterias catalizan y aceleran la oxidación de  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$  como se aprecia en la reacción (2). Es entonces cuando la reacción (4) de oxidación de la pirita por el  $Fe^{3+}$  empieza a tener lugar, siendo la causa de la rápida oxidación de la pirita a pH ácido. Con tal razón, podemos concluir que geoquímica de las aguas ácidas es un fenómeno complejo, al tenerse involucrados diversos procesos físicos, químicos y biológicos jugando un papel importante en la producción, liberación, movilidad y mitigación de los contaminantes.

## **2.9 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DESTINADO AL TRATAMIENTO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA**

Como un aspecto general, se puede afirmar que el proceso de caracterización del agua es complicado debido a determinados problemas que se presentan como, por ejemplo, un valor del pH muy bajo, una gran fluctuación en la concentración de metales pesados, compuestos biológicamente tóxicos y variaciones climáticas.

A pesar de que el método de tratamiento pasivo mediante humedales artificiales usados en el tratamiento de drenajes ácidos mineros tiene un historial significativo, se debe dejar en claro que no existe un diseño claramente establecido, diseñar un sistema de humedales artificiales para tratamiento de drenajes ácidos mineros requiere un previo estudio de las características fisicoquímicas del drenaje de mina, de la técnica que se aplicará y de la experiencia de los investigadores.

Investigadores como el Ing. Steven R. Witthar de la Universidad de Missouri, consideran que, a pesar de que los problemas generados por las aguas ácidas de la mina son mayores a los que implican desagües domésticos, el diseño tiene un criterio similar.

Los parámetros más críticos para los procesos, dentro de los humedales artificiales son los siguientes:

1. Características del agua a tratar, es decir, concentración de metales y sulfatos, variación del pH y temperatura ambiental.
2. Velocidad del flujo de circulación sobre los sustratos en medio aeróbico y/o anaeróbico, una velocidad adecuada evitará la saturación del humedal, sobre todo cuando el drenaje a ser tratado contiene alta concentración de metales, lo cual conllevará a un estancamiento e inadecuado funcionamiento del sistema, por lo tanto, la velocidad adecuada será la mínima para evitar la saturación del humedal.
3. Tiempo de retención, teniendo en cuenta que es la variable más importante para la remoción de metales pesados con humedales, ya

que depende de este para llevar a cabo todos los lentos procesos biológicos, físicos y químicos del sistema.

4. Sustrato adecuado para evitar corto circuitos, zonas muertas y zonas de acumulación en el sistema, así como para el desarrollo de la vegetación.
5. Concentración de nutrientes naturales.
6. Tipo de vegetación en el humedal.
7. Temperatura ambiental y humedad relativa.
8. Eliminación de metales pesados por etapas.

## **2.10 CRITERIOS CONSTRUCTIVOS PARA LA ELABORACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DESTINADO AL TRATAMIENTO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA**

A continuación, se describen los criterios a considerar en la construcción de un humedal artificial:

### **1. Requerimientos de área**

El dimensionamiento del humedal debe permitir el tratamiento de drenajes ácidos de mina en cualquier época del año y teniendo en cuenta además las precipitaciones que se produzcan en la zona. En general, independientemente del contenido de desecho, el diseño de humedal que produce la mejor calidad de agua es el que tiene la mayor proporción de área de tratamiento a flujo base, siendo el área mínima recomendable de 22.5 m<sup>2</sup> / GPM.

### **2. Pendiente**

En el proceso constructivo del humedal se debe procurar una pendiente y un alineamiento adecuado, de manera que el flujo que pase por todos los compartimentos sea distribuido uniformemente, evitando la generación de corto circuitos, zonas muertas y zonas de acumulación. Se recomienda proporcionar una inclinación gradual con pendientes de 0.01 – 0.02 m/m, es conveniente no tomar pendientes superiores a este rango para evitar mayores costos de excavación.

### **3. Profundidad del humedal**

Los procesos involucrados en el desempeño del humedal varían con la profundidad optada en el diseño. Por lo general los humedales de flujo subsuperficial tienen profundidades que varían desde 0.50 a 1.00 m. Se recomienda mantener láminas de agua de 5.00 cm aproximadamente para garantizar el flujo sub superficial, pero para el proyecto, con fines de evitar la proliferación de insectos se cubrió los compartimentos con piedra de ½" y ¾".

#### **4. Relación longitud - ancho**

Si tenemos en cuenta la presencia del sustrato, las raíces de la vegetación, detritos y la configuración seleccionada para las celdas del humedal, esto va generar una oposición al flujo por fricción, y a medida que el flujo se desplaza a través del humedal la resistencia se hace aún mayor. Para evitar dichos inconvenientes de operación, es recomendable tener en cuenta la relación longitud/ancho del humedal  $\geq 4/1$ .

#### **5. Consideraciones adicionales**

- 5.1 Los humedales artificiales pueden ser diseñados según la forma de circulación del agua, como un sistema de flujo superficial o también como un sistema de flujo sub - superficial.
- 5.2 Elegir el sustrato óptimo para el desarrollo de las plantas acuáticas, la permeabilidad del sustrato es una variable crítica para un correcto desempeño del humedal artificial.
- 5.3 Las plantas acuáticas tienen que ser adaptadas a sustratos saturados en agua, lo cual se convierte en un medio anaeróbico, evaluando plantas acuáticas emergentes, sumergibles y/o flotantes.
- 5.4 Plantas acuáticas que produzcan considerables cantidades de biomasa pueden incentivar y/o sostener el crecimiento de microorganismos.
- 5.5 La configuración de un sistema de humedales puede ser en múltiples celdas en serie, o en paralelo y en ambas combinaciones.
- 5.6 Para evitar la infiltración de contaminantes en fuentes de agua subterránea, es necesario revestir con arcilla o cemento o con una geomembrana el terreno del humedal.
- 5.7 Al final del proceso se puede utilizar caliza para ayudar con la neutralización del pH.

Steven R. Witthar, discute algunas consideraciones para el diseño de humedales artificiales, las cuales serán tomadas como base para la presente investigación. Algunas de ellas se mencionan a continuación:

- 1) Crear condiciones biológicas para asegurar el pH adecuado.
- 2) Consideración de macronutrientes.
- 3) La vegetación apropiada selecta.
- 4) Conseguir asesoría de expertos implicados en el campo de la ecología y de la toxicología.

La siguiente tabla resume algunas consideraciones para el diseño (Steven R. Witthar):

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Profundidad del agua (cm)   | < 45  |
| Número de celdas            | Múltiples   |
| Aspecto de ratio L/A        | > 4/1   |
| Velocidad de flujo (pies/s) | 0.1 - 1   |
| Tiempo de retención (días)  | 0.25 - 75   |
| Tipo de sustrato            | Hongos, compost, turba, aserrín, estiércol y fertilizantes. |

## 2.11 FUNDAMENTOS PARA LA SIMULACIÓN DE UNA MUESTRA DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS

La química de las aguas residuales de mina es muy compleja, razón por la cual para el presente proyecto de investigación se ha optado, con fines prácticos y de investigación, elaborar una muestra compuesta con diversos reactivos, lo cual simulará un drenaje ácido minero. El tipo de humedal seleccionado será orientado y adecuado al tratamiento de un drenaje ácido de mina el cual tomando como referencia estudios previos en clasificación de drenajes mineros será caracterizado fisicoquímicamente, tal y como se describe a continuación:

### 2.11.1 Clasificación de drenajes mineros

Para clasificar los tipos de drenajes de mina se requiere hacer un estudio detallado de las condiciones físicas del medio, realizar muestreos de agua adecuados para su respectivo análisis en laboratorio, determinando las concentraciones metálicas presentes, es necesario que la medición de parámetros como: pH, contenido de oxígeno, conductividad, temperatura, turbidez y otros, sea in-situ. Diversos autores clasifican los drenajes ácidos de mina según los siguientes criterios:

1. Los drenajes de mina se pueden subdividir en dos grupos:
  - ✓ Drenajes alcalinos o aguas con bajo potencial de solubilización.
  - ✓ Drenajes ácidos o aguas con alto potencial de solubilización.
2. El investigador Steven White clasifica las aguas residuales de mina en función al pH y los agrupa en 06 categorías:

**Tabla 1 - Clasificación de Aguas Residuales (White)**

| Tipo de muestra           | pH         |
|---------------------------|------------|
| Altamente ácida           | 1.5 a 4.5  |
| Blanda ácida              | 3.5 a 5.5  |
| Blanda, ligeramente ácida | 5.0 a 7.0  |
| Dura, neutra a alcalina   | 7.0 a 8.5  |
| Blanda, alcalina          | 7.5 a 11.0 |
| Muy Salina                | 6.0 a 9.0  |

3. En 2001 los investigadores Kevin A. Morin y Nora M. Hutt, tienen en cuenta el pH del drenaje y los contenidos de metales presentes en el mismo, para agruparlos en 04 tipos:

**Tabla 2 - Clasificación de Drenajes de Mina (Morin & Hutt)**

| Tipo de muestra | pH          | Descripción   |
|-----------------|-------------|---|
| Ácido           | < 6         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Acidez generada por oxidación de minerales, particularmente de sulfuros.</li> <li>- El nivel de metales casi disueltos es mayor que en drenajes casi neutros.</li> <li>- Asociado a minas metálicas, de carbón y piritas.</li> </ul>   |
| Alcalino        | > 9 ó 10    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta alcalinidad generada por disolución de minerales básicos, particularmente óxidos, hidróxidos y algunos silicatos.</li> <li>- Niveles de algunos metales como el Al son mayores que en los drenajes casi neutros.</li> <li>- Asociado con minería de diamantes, molienda de bauxita, cenizas de combustión de carbón.</li> </ul> |
| Casi neutro     | 6-9 ó 10    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dependiendo de la abundancia de los minerales, en determinados periodos pueden ser ácidos o alcalinos.</li> <li>- La concentración de metales disueltos algunas veces puede exceder niveles tóxicos.</li> </ul>  |
| Otros           | Irrelevante | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede afectar la concentración de metales.</li> <li>- Asociado a minería no metálica como: potasa, sales, boratos, bentonitas, gravas, arcillas, etc.</li> </ul>   |

4. Los ingenieros Jeff Skousen y Paul Ziemkiewicz toman en cuenta el pH y el contenido de oxígeno y metales pesados para hacer una clasificación de los drenajes de mina y lo agrupan en 5 tipos:



**Tabla 3 - Tipos de drenajes de mina (Skousen and Ziemkiewics)**

| TIPO | pH    | DESCRIPCIÓN   |
|------|-------|---|
| I    | < 4,5 | Alta concentración de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, y otros metales.<br>Alto contenido de oxígeno.<br>Muy ácido (llamado Drenaje Ácido de Mina)   |
| II   | < 6,0 | Alta cantidad de sólidos disueltos.<br>Alta concentración de ión ferroso ( $Fe^{2+}$ ) y Mn.<br>Bajo contenido de oxígeno.<br>Por oxidación, el pH del agua baja drásticamente hasta convertirse en Tipo I.   |
| III  | > 6,0 | Moderada a alta cantidad de sólidos disueltos.<br>Bajo a moderado contenido de ion ferroso ( $Fe^{2+}$ ) y Mn.<br>Bajo contenido de oxígeno.<br>Alta alcalinidad (llamado Drenaje Alcalino de Mina).<br>Por oxidación de metales la acidez generada es neutralizada por la alcalinidad presente en el agua. |
| IV   | > 6,0 | Alta cantidad de partículas disueltas.<br>Drenaje neutralizado, pero todavía no se han fijado los hidróxidos en el agua.<br>A mayor tiempo de residencia en las balsas mayor fijación de partículas y el agua puede llegar a ser similar al de Tipo V.  |
| V    | > 6,0 | Agua del drenaje es neutralizado.<br>Alta cantidad de sólidos disueltos.<br>Gran cantidad de hidróxidos precipitados y fijados en las balsas.<br>Cationes restantes son disueltos por Ca y Mn.<br>Oxi-aniones solubles como bicarbonato y sulfato quedan en la solución.                                    |

Para nuestro estudio tomaremos en cuenta la clasificación de Skousen y Ziemkiewicz, ya que es más específica y toma en cuenta que los drenajes mineros pueden ser ácidos o alcalinos.

- En drenajes ácidos los valores de pH son entre 2 a 6, el anión principal es el Sulfato ( $SO_4^{-2}$ ), siendo la mayoría de cationes presentes el Fe, Mn y Al y en menor proporción Ca, Na, K, Mg y otros elementos.
- En drenajes alcalinos los valores de pH son entre 6 a 9 el  $HCO_3$  es más significativo que el  $SO_4^{-2}$  y los contenidos de Ca, Mg y Na son más elevados que los de Fe y Al.

La muestra que simularemos para tratar en el humedal tendrá las características de un drenaje de mina tipo II, según la clasificación de Skousen y Ziemkiewicz, la cual presentará un rango de pH entre 4.5-6.0, y estará compuesto por iones de

hierro, manganeso y sulfatos. No se tendrá en cuenta el Aluminio, lo cual justificaremos teniendo previo conocimiento de que no es un metal difícil de remover en comparación con el hierro y manganeso, y en altas concentraciones, es decir, mayores a 25 mg/L, genera un precipitado blanco, lo cual puede reducir la permeabilidad del humedal, conduciendo a un estancamiento del sistema. Tampoco se tendrán en cuenta otros metales como Cobre, Plomo, Cadmio, Zinc o Níquel ya que la gran mayoría de estos precipitan fácilmente al elevarse ligeramente el pH de la muestra.

### **2.11.2 Análisis del comportamiento que probablemente adopte cada uno de los componentes de la muestra**

#### **Sulfatos**

En un medio anaeróbico son consumidos los iones de sulfatos, esto se debe a que la materia orgánica presente en el humedal, estimula el desarrollo de las bacterias reductoras de sulfatos, las cuales transforman el  $\text{SO}_4^{-2}$  del drenaje ácido de mina en ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y alcalinidad en forma de iones carbónicos y/o bicarbonatos, tal como se representa en la siguiente ecuación química:



Siendo  $\text{CH}_2\text{O}$ , una representación de la materia orgánica presente, observamos que el  $\text{H}_2\text{S}$  se disuelve y ioniza, lo cual genera iones de sulfuro, que reaccionan con una cantidad de iones del metal presente, produciendo precipitaciones de sulfuro de dicho metal. La precipitación de metales como los sulfuros con respecto a los óxidos tiene las siguientes ventajas:

- Los precipitados de sulfato son más densos que los precipitados de óxido, de tal manera que el proceso de sedimentación es más rápido.
- La acidez neutralizada es producto de la alcalinidad generada por ayuda de la reducción del ion sulfato.

Por lo tanto, la reducción del sulfato es reconocida como el mejor tratamiento para cualquier tipo de drenaje ácido minero, el ingeniero Paul Eger de la universidad de Rochester NY indica que "la reacción primaria de importancia

para el retiro del metal es la reducción del sulfato", porque no solamente se quitan los metales sino también se aumenta el pH y por lo tanto el drenaje ácido de mina se trataría con efectividad.

### **Hierro**

Es el elemento que se encuentra siempre presente en cualquier drenaje ácido de mina, en pequeñas o grandes cantidades. Es producto de la reacción de oxidación de la pirita, siendo esta la principal responsable de la generación de las aguas ácidas. La forma del hierro en el agua depende del pH, el hierro puede pasar de una forma disuelta (por ejemplo,  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{FeOH}^+$ ) a una forma precipitada como  $\text{FeCO}_3$  o  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , al aumentarse el potencial (oxidación), el pH, o ambos. El hierro disuelto en el agua promueve el crecimiento de ferrobacterias, como la Metallogenium que cataliza el ion férrico a valores de pH entre 3.5 y 4.5 y la Thiobacillus ferrooxidans que cataliza la reacción por debajo de un pH 3.5. Con un pH entre 2.3 a 3.5 el ion férrico precipita por hidrólisis como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  el cual presenta un color naranja oscuro.

### **Manganeso**

El manganeso es un metal que se encuentra con frecuencia y en altas concentraciones en los drenajes ácidos de mina, no como metal en su forma natural, sino en sus formas más comunes como dióxido de manganeso, carbonato de manganeso y silicato de manganeso. Es el metal más difícil de remover en una solución, ya que presenta una alta solubilidad en un amplio rango de pH, esto es entre 4.5-8.0. Además, la oxidación química del Mn es cinéticamente lenta, por lo tanto, se requiere un pH más elevado para su precipitación. La forma más efectiva de eliminar Mn del agua es elevar el pH por encima de 9.0 y permitir que su estado de oxidación  $\text{Mn}^{+2}$ , (que es el más común en medio acuoso) se oxide a  $\text{Mn}^{+3}$  o  $\text{Mn}^{+4}$ , formándose óxidos de Mn insolubles o Carbonatos de Mn.

### **2.11.3 Análisis del comportamiento que probablemente adopte la interacción entre los componentes de la muestra**

Para la biorremediación de una muestra compuesta con iones de hierro, manganeso y sulfatos, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ La reducción del sulfato en la zona anaeróbica aumentará el pH, y bajo esas condiciones la solubilidad de los metales en el agua disminuye, lo que conllevará a su precipitación.
- ✓ La eliminación del manganeso requiere una superficie mucho mayor que para eliminar el hierro, ya que la velocidad de oxidación del Mn es entre 20 y 40 veces más lenta que la del Fe.
- ✓ La eliminación de estos dos metales en los humedales se produce de forma secuencial y no simultánea.
- ✓ Si el humedal se construye con el objetivo de eliminar Fe y Mn, para que sea efectiva, la superficie total debe ser igual a la suma de las superficies parciales necesarias para eliminar cada uno de ellos.
- ✓ La eficiencia en retención de metales tiene relación con la facilidad con que éstos se oxidan; es por esto la mayor retención de Fe que de Mn.
- ✓ El proceso de oxidación del Mn es más lento que el Fe, y este además es sensible a la presencia de Fe, razón por la cual esto puede impedir o invertir la oxidación del Mn.
- ✓ En un sistema de humedales la precipitación del Fe y Mn es de forma secuencial, primero lo hace el Fe y luego el Mn, por lo que es probable que, en el proceso de tratamiento, si el Mn llega a precipitar lo hace al final del humedal, luego de que todo el Fe haya precipitado.

## **2.12 CRITERIO DE SELECCIÓN DEL TIPO DE VEGETACIÓN QUE CONTENDRÁ EL HUMEDAL PROPUESTO**

Es importante adoptar un buen criterio de selección de la vegetación en el tratamiento de drenaje ácido de minas, especialmente por los procesos microbianos los cuales contribuyen en la reducción de las concentraciones de metales. Puesto que el drenaje ácido de mina es altamente ácido por contener altas concentraciones de metales, la vegetación tiene que ser seleccionada tomando como consideración principal su capacidad de resistir bajo las condiciones locales del desarrollo del proyecto.

En cuanto al criterio de elección de la especie *Dracaena Sanderiana*, son sus diversas características como, por ejemplo, la gran densidad de sus raíces, siendo una planta de crecimiento rápido y de las más productivas que existe sobre la superficie terrestre del planeta. Además, es muy resistente y capaz de soportar múltiples factores estresantes medioambientales como falta o exceso de agua e incluso temperaturas extremadamente bajas. La biomasa del bambú posee asimismo múltiples propiedades de interés si se compara con otros tipos de biomasa vegetal, una de ellas su elevado valor térmico. Por tanto, la biomasa producida durante el tratamiento de aguas residuales puede aprovecharse en la misma zona de la plantación como combustible, por ejemplo, para la calefacción de edificios administrativos o escuelas.

### **2.12.1 Origen de la especie**

Es la especie de arbusto más común del género *Dracaena*, esta es originaria de África y Asia. La *Dracaena Sanderiana* es comúnmente conocida como bambú de interiores. Se encuentra distribuida en las zonas tropicales y subtropicales de la India y África, aunque en la actualidad, se ha extendido por todo el mundo, a excepción de Europa. Este tipo de plantas, se conocen como plantas ornamentales, las cuales requieren de lugares sombríos, sin exponerse a la luz directa del sol.

### **2.12.2 Vida, desarrollo y características**

La especie *Dracaena Sanderiana*, tiene las siguientes características:

- Su período de vida es entre 5-6 años como mínimo.
- Su desarrollo suele ser lento, pero llegan a alcanzar alturas entre los 40 y 150 cm.
- El diámetro promedio de los tallos es igual a 1.5 cm.
- La temperatura en la cual se desarrolla mejor, está entre los 20 y 28°C siendo la mínima 5 °C.
- Se adapta bien desde el nivel del mar hasta los 1200 msnm.
- El pH debe situarse en un rango entre 5 y 8.
- Es una especie de tallo delgado, con hojas de color verde distribuidas a lo largo del mismo.
- La humedad del ambiente para fomentar su desarrollo debe ser entre 60-80%.
- Riego moderado de dos a tres veces por semana.

Aunque esta especie vive con pocos requerimientos de cuidado, puede presentar algunos inconvenientes como manchas en sus hojas, que suelen ser causadas por hongos o bacterias. Adicional a esto puede darse un proceso de descomposición en los tallos a causa del enraizamiento. Las hojas pueden presentar con el tiempo un color amarillento, normal si se produce lentamente, como parte del envejecimiento.



**Fig.1:** Plantación natural de Dracaena Sanderiana



**Fig.2:** Uso Comercial – Ornamental de Dracaena Sanderiana

### CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 CONFIGURACIÓN Y ESQUEMA DEL HUMEDAL PROPUESTO

En el proceso de investigación se determinará parámetros físico-químicos como pH, temperatura, humedad, así como la concentración de metales a la entrada y salida del sistema, con estos resultados se concluirá si es la mejor propuesta técnica económica para ser replicada y escalada a nivel nacional. El área disponible en CITRAR será destinada a la construcción e instalación de los componentes del sistema a escala piloto, el cual consiste en un humedal artificial de flujo sub superficial, elaborado a partir de un módulo de vidrio de espesor de 8.00 mm con 2.00 m de largo y 0.50 m de ancho, ha sido separado en 04 celdas o compartimentos separadas por 03 planchas de vidrio de 0.36 m, 0.34 m y 0.32 m respectivamente, la altura del lecho de piedras de cada compartimento estará hasta el borde de cada plancha de vidrio, con lo cual se tiene una somera lámina de agua que inunda el sustrato sobre el que se desarrolla la vegetación, la cual facilitará las reacciones biológicas a nivel sub-superficial con la intención de mejorar así, la remoción de los metales pesados.



**Fig.3:** En la imagen se puede observar los 03 puntos de muestreo para cada compartimento del módulo de vidrio.



La configuración elegida tiene la intención de evitar las zonas muertas en el recorrido del humedal, esto consiste en 03 vertederos de diferente altura en orden descendente, los cuales descargan hacia unas canaletas que evacúan la muestra hacia la parte más baja del compartimento mediante unas tuberías de distribución, esto es, con la finalidad de distribuir la muestra lo más uniformemente posible, a lo largo y ancho del humedal.



**Fig.4:** Módulo de vidrio de 8.00 mm de espesor con 03 pantallas de separación de 36.00, 34.00 y 32.00 cm, de altura, desde el ingreso de la muestra al humedal, hasta la salida respectivamente.

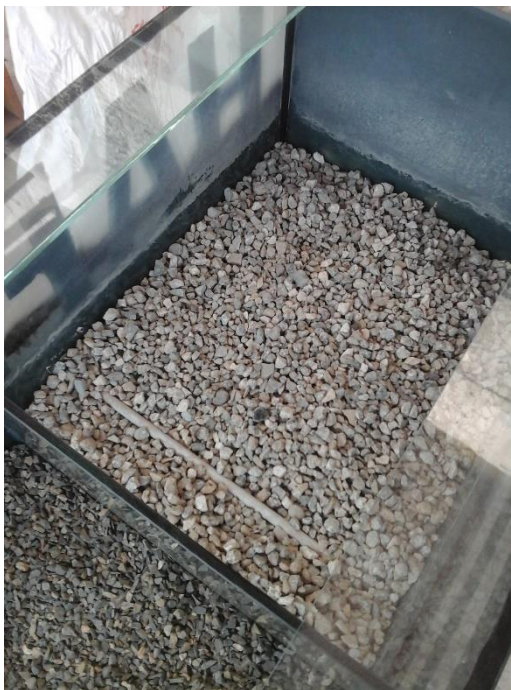


**Fig.5:** Instalación de tuberías de recolección de 1/2" para toma de muestra en cada compartimento.

El sustrato elegido para ser contenido en cada celda del humedal, fue piedra de construcción, el cual es conocido por ser un material inerte, tratando así, de evitar la reacción con algún componente de la muestra, la granulometría varía desde 3/8", 3/4" y 1/2", con lo cual se espera disminuir la oposición al flujo a lo largo del humedal, con esto se procura evitar la acumulación de metales en las canaletas y tuberías de distribución. También se cuenta con tuberías de recolección y válvulas de 1/4" para cebado y toma de muestras en cada compartimento.



**Fig.6:** Proceso de llenado de cada compartimento del módulo, con piedra de diferente granulometría hasta el borde de cada pantalla.



**Fig.7:** Recubrimiento de las líneas de recolección con el sustrato elegido.

Para el desarrollo de nuestra investigación se optó por la especie *Dracaena Sanderiana*, más conocido como el bambú de la suerte, la cual presentó una buena adaptación al medio, buen desempeño, capacidad de reproducción, buen aspecto visual, así como una fuerte fijación de sus raíces en el lecho de piedra.



**Fig.8:** Proceso finalizado de llenado y plantación de cada compartimento, para proceder con la puesta en marcha del humedal artificial.



**Fig.9:** Crecimiento total de la especie *Dracaena Sanderiana*, en las ultimas semanas de prueba.

Se cuenta con un tanque mezclador de 600 Litros de capacidad útil, el cual está elevado por medio de un andamio a una altura de 1.70 m. En esta unidad de almacenamiento se mantendrá la muestra sometida a movimiento, a una revolución constante de 40 RPM mediante un rotor con paletas; la inyección del líquido en el humedal fue con un caudal pequeño y constante gracias a un dispositivo regulador de nivel, esto permitió alcanzar un tiempo de retención relativamente alto, lo cual va de acuerdo con los lentos procesos de depuración del agua. El objetivo principal fue la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de sustancias contaminantes.



**Fig. 10:** tanque regulador de presión de ingreso, tubería con válvulas de regulación, incluye derivación con válvula de purga para muestreo y calibración del caudal.



**Fig. 11:** Tanque de 600 L, conteniendo la mezcla de metales y sulfatos.

Para la simulación de una muestra de drenaje ácido se mezclaron compuestos en proporciones adecuadas, de tal manera, que se evitó la generación de un exceso de sedimento al mezclarse en el tanque, los 02 compuestos mencionados son sulfato ferroso y sulfato de manganeso disueltos en agua potable, obteniéndose así, un medio sulfúrico característico de una muestra de este tipo de agua, con un pH que oscila entre 3-4. Se eligió el fierro porque es el metal que se encuentra siempre presente y en las más altas concentraciones en cualquier muestra de drenaje ácido de mina, además del manganeso por ser el metal más difícil de remover en concentraciones medias, altas y en cualquier condición de tratamiento. Se ha considerado que la remoción de sulfatos y la diferencia de pH, es un buen indicador de la eficiencia del proceso para la purificación natural de la muestra de drenaje ácido.



**Fig. 12:** Se observa la muestra en movimiento constante a 40 RPM consistente en la mezcla de reactivos en el tanque de almacenamiento.



**Fig. 13:** la toma de muestra se efectuó directamente del tanque de 600L. Nótese el color rojizo de la muestra debido a la aireación.

## **3.2 PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL**

### **3.2.1 Actos preliminares**

La investigación se desarrolló entre los meses de diciembre 2017 y mayo 2018, durante la estación de verano, esto es, con la intención de obtener los resultados más favorables del proceso. Una vez elaborado el módulo con vidrio de 8.00 mm de espesor y la instalación de sus respectivas válvulas de purga - muestreo, se procedió con la prueba de estanqueidad en cada compartimento, la cual tuvo una duración de 07 días, donde no se observó descenso alguno del nivel de agua, lo que nos garantiza la ausencia de fugas durante el proceso. Apenas se concluyó con el cernido y lavado de las piedras de diferentes diámetros, estas se colocaron en cada compartimento del humedal, conteniendo el primero las piedras de 3/8", el segundo y el tercero las piedras de 3/4" y el cuarto y último de 1/2", llenándose completamente hasta el borde de la pantalla. Se procedió a instalar los demás componentes del sistema como el andamio de 1.70 m de altura, el tanque elevado de 600 litros, el tanque regulador de presión y la válvula reguladora de caudal. Una vez instaladas las canaletas en cada compartimento, se sometió el sistema a una prueba pre operacional con agua libre de partículas y turbiedad, para su limpieza previa con el objeto de arrastrar partículas presentes y observar su desempeño a diversos caudales.

### **3.2.2 Desempeño y adecuación del tipo de planta elegida**

La vegetación que finalmente se usó fue la *Dracaena Sanderiana*, conocido comúnmente como el bambú de interiores. Las pruebas preliminares con altas cargas de metales provocaron la necrosis de sus hojas, tornándose de un color amarillo moteado, para finalmente secarse y caerse, sin embargo, no dejó de proliferar y renovarse. En las siguientes etapas tuvo un desempeño adecuado, engrosando su tallo y arraigándose firmemente en el sustrato. Luego de 40 días de iniciadas las pruebas preliminares, se concluyó que el proceso de adecuación de las plantas en el medio ácido fue favorable, resistiendo las altas concentraciones de metales y sulfatos, a lo largo del proceso.

### **3.2.3 Elección del tiempo de retención**

Las primeras pruebas en el humedal se realizaron con un tiempo de retención de 3.0 días, en las cuales, se obtuvieron resultados anómalos, esto posiblemente debido al proceso de adaptación de las plantas, la acumulación de metales en los primeros compartimentos o un inadecuado proceder en la toma de muestra, motivo por el cual se omitieron dichos resultados, para pasar a tiempos de retención mayores como 4.0 y 5.0 días, en los que si se obtuvieron resultados favorables en cuanto a remoción de metales e incremento de pH. Además, se realizó una última prueba con un tiempo de retención de 6.0 días, la cual se suspendió por motivo que el caudal de ingreso al humedal era muy pequeño, ocasionando de esta forma la acumulación de sedimentos y colmatación en todos los componentes del sistema tales como tanque de almacenamiento, tanque regulador, tuberías y válvulas, generando inconvenientes en la operación del mismo y propiciando el mantenimiento y limpieza frecuente de los componentes del sistema.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

### 4.1 PROCESO DE TRATAMIENTO Y TOMA DE MUESTRAS: MES DE MARZO

**1. Fechas para la toma de muestras:**

Del 05 al 28 de marzo del 2018

**2. Tiempo de retención propuesto:**

4.0 días

**3. Caudal de ingreso al humedal:**

24 ml/min

**4. Metodología elegida para determinar la concentración de cada elemento en la muestra:**

- **Fierro:** absorción atómica
- **Manganeso:** absorción atómica
- **Sulfatos:** gravimetría

**5. Método de medición de la eficiencia:**

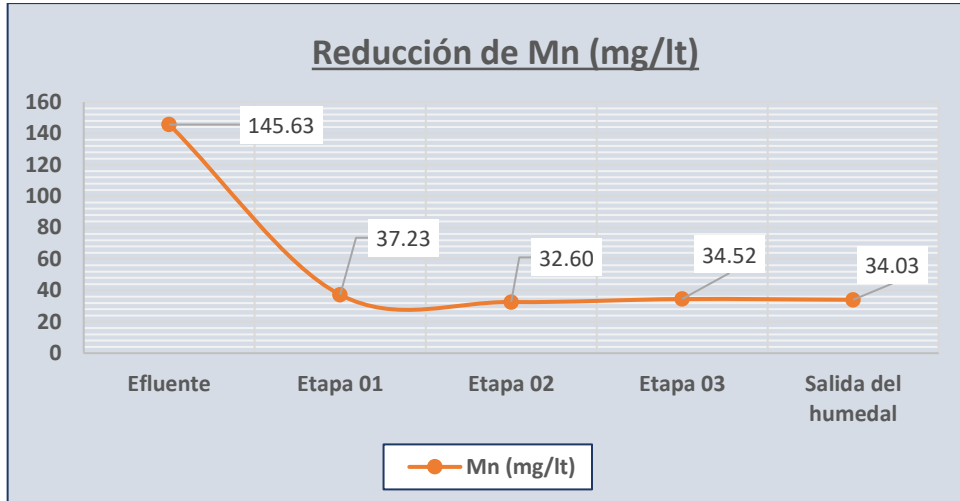
Reducción porcentual -  $[C_{in}-C_{out}/C_{in}] \times 100\%$

**Tabla N° 01:**

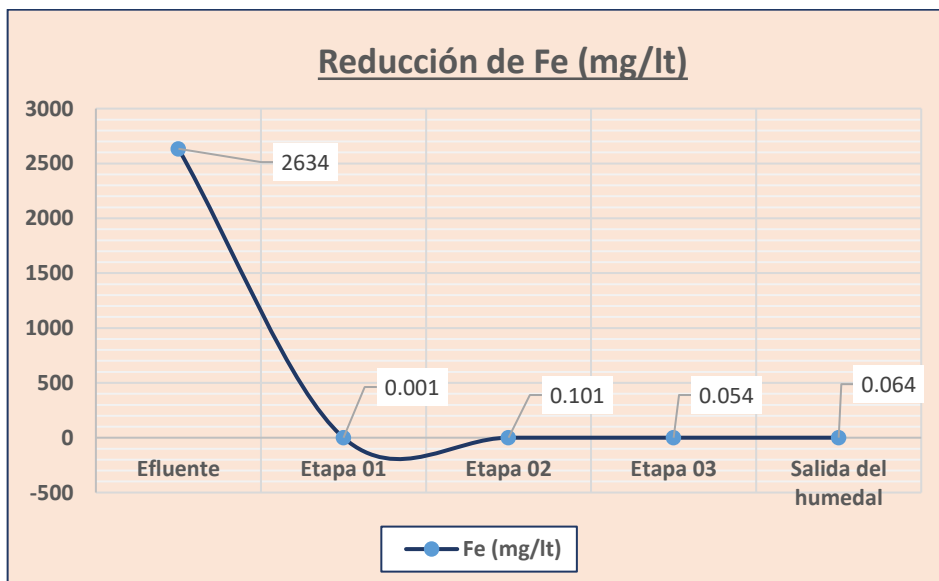
| Fecha: 05/03/2018  |             |      |           |           |                 |
|--------------------|-------------|------|-----------|-----------|-----------------|
| T° = 29°C          | Hr(%) = 60% | pH   | Mn (mg/l) | Fe (mg/l) | Sulfatos (mg/l) |
| Tipo de Muestra    |             |      |           |           |                 |
| Efluente           |             | 5,80 | 145,63    | 2634      | 860             |
| Etapa 01           |             | 6,00 | 37,23     | 0,001     | 520             |
| Etapa 02           |             | 6,30 | 32,60     | 0,101     | 480             |
| Etapa 03           |             | 6,54 | 34,52     | 0,054     | 340             |
| Salida del humedal |             | 6,61 | 34,03     | 0,064     | 390             |
| Eficiencia (%)     |             |      | 76,63%    | 99,99%    | 54,65%          |



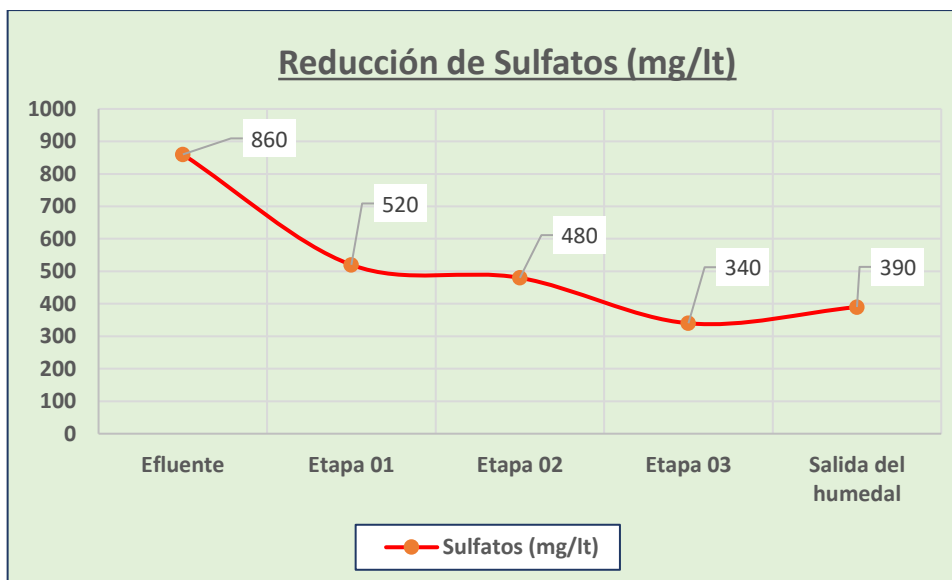
**Gráfica N° 01:**



**Gráfica N° 02:**



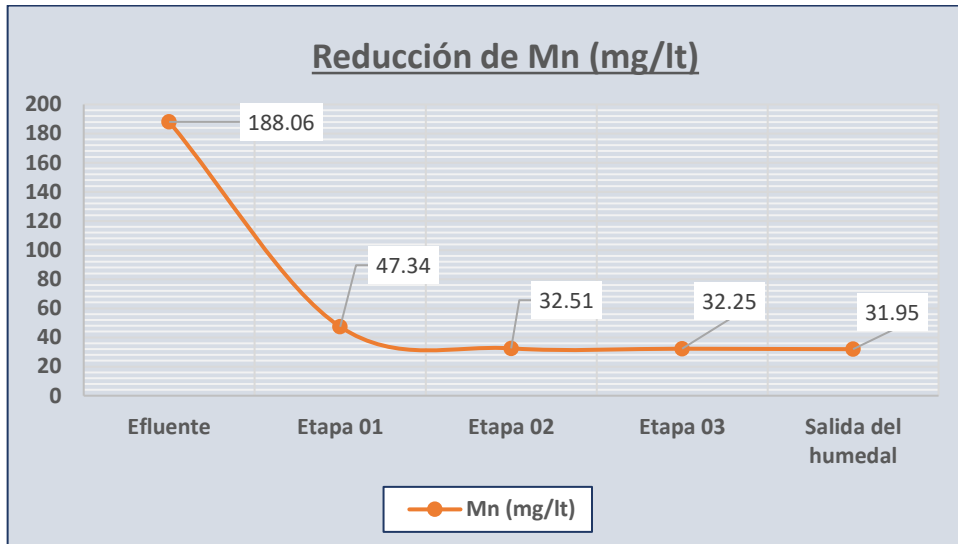
**Gráfica N° 03:**



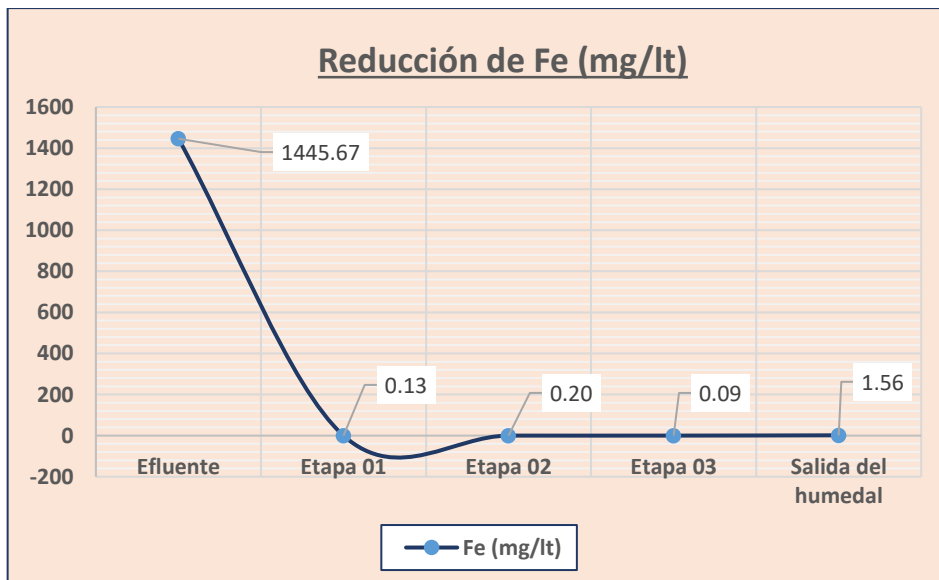
**Tabla N° 02:**

| Fecha: 08/03/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 27°C          | Hr(%) = 56% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,77 | 188,06      | 1445,67     | 440               |
| Etapa 01           |             | 6,80 | 47,34       | 0,13        | 640               |
| Etapa 02           |             | 6,90 | 32,51       | 0,20        | 380               |
| Etapa 03           |             | 6,92 | 32,25       | 0,09        | 580               |
| Salida del humedal |             | 6,98 | 31,95       | 1,56        | 480               |
| Eficiencia (%)     |             |      | 83,01%      | 99,89%      | -9,09%            |

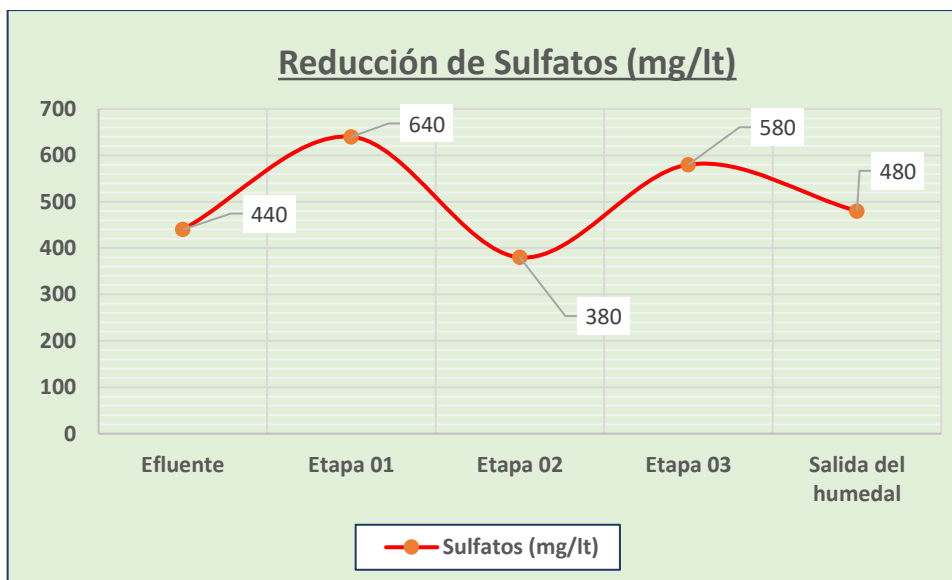
**Gráfica N° 04:**



**Gráfica N° 05:**



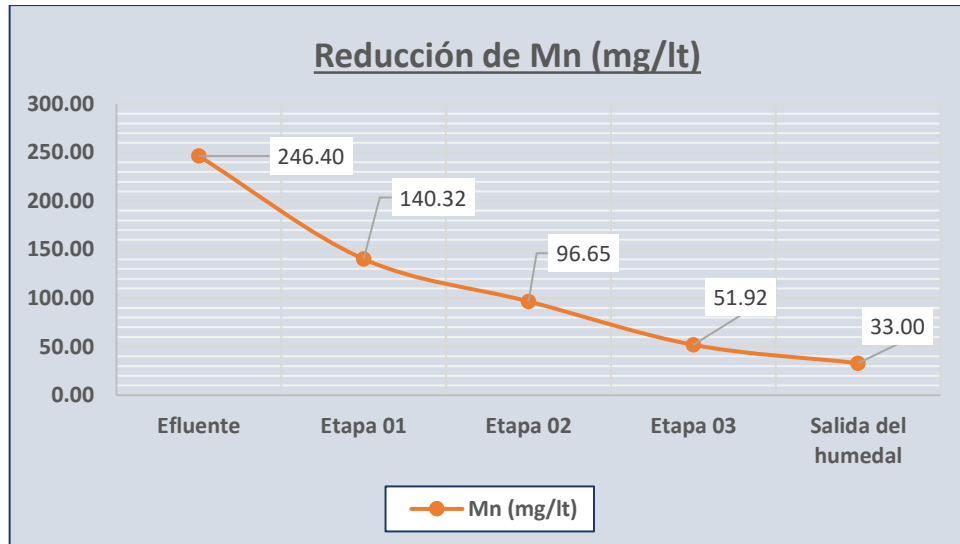
**Gráfica N° 06:**



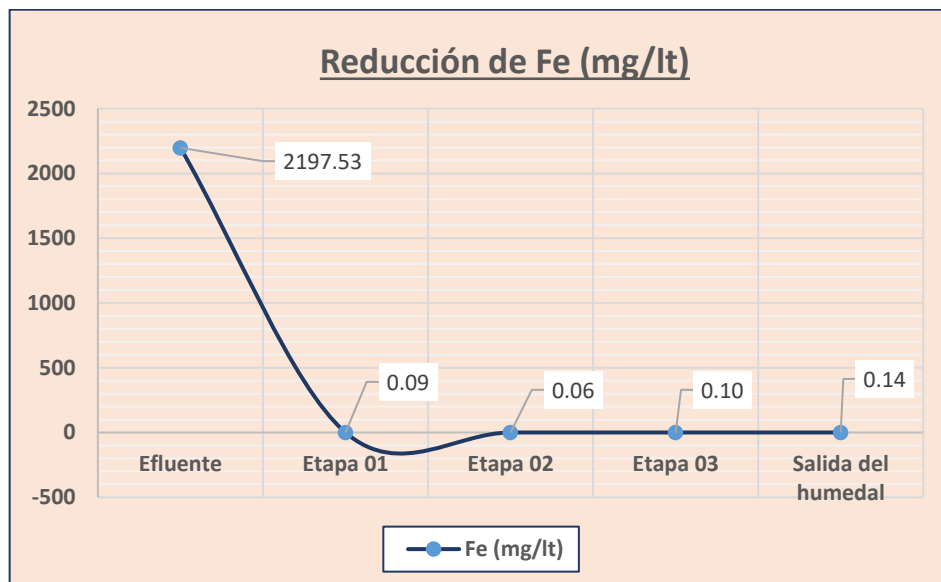
**Tabla N° 03:**

| Fecha: 12/03/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 29°C          | Hr(%) = 52% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,83 | 246,40      | 2197,53     | 720               |
| Etapa 01           |             | 7,00 | 140,32      | 0,09        | 960               |
| Etapa 02           |             | 6,98 | 96,65       | 0,06        | 760               |
| Etapa 03           |             | 7,05 | 51,92       | 0,10        | 640               |
| Salida del humedal |             | 7,07 | 33,00       | 0,14        | 400               |
| Eficiencia (%)     |             |      | 86,61%      | 99,99%      | 44,44%            |

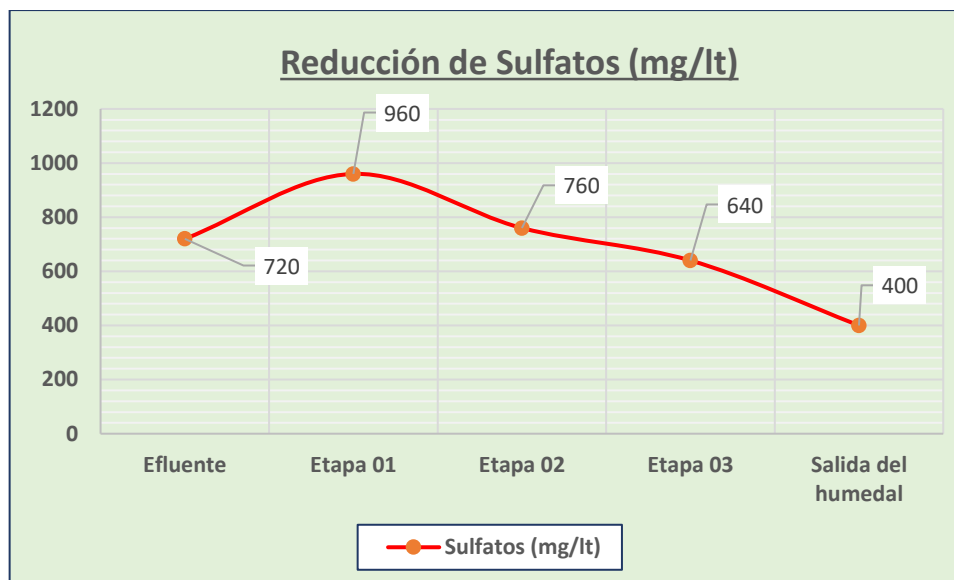
Gráfica N° 07:



Gráfica N° 08:



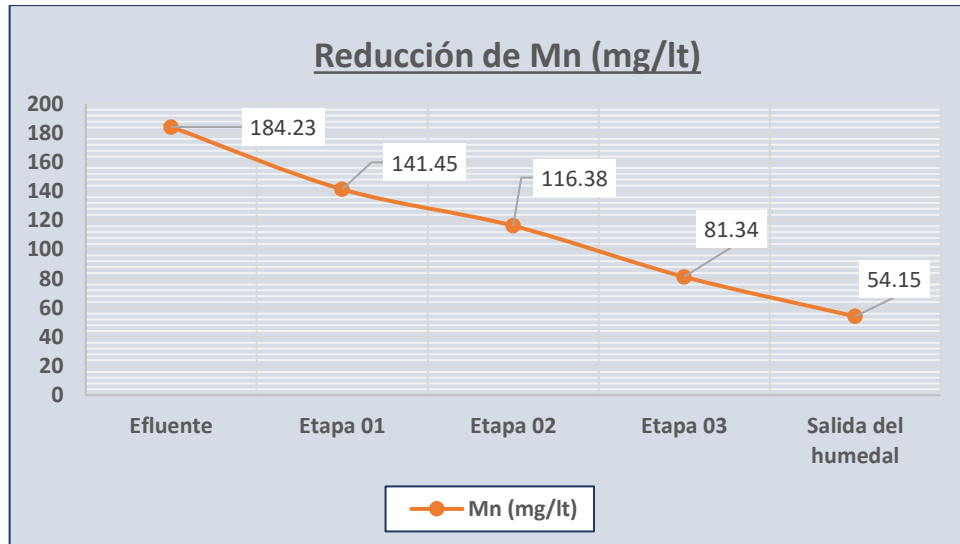
**Gráfica N° 09:**



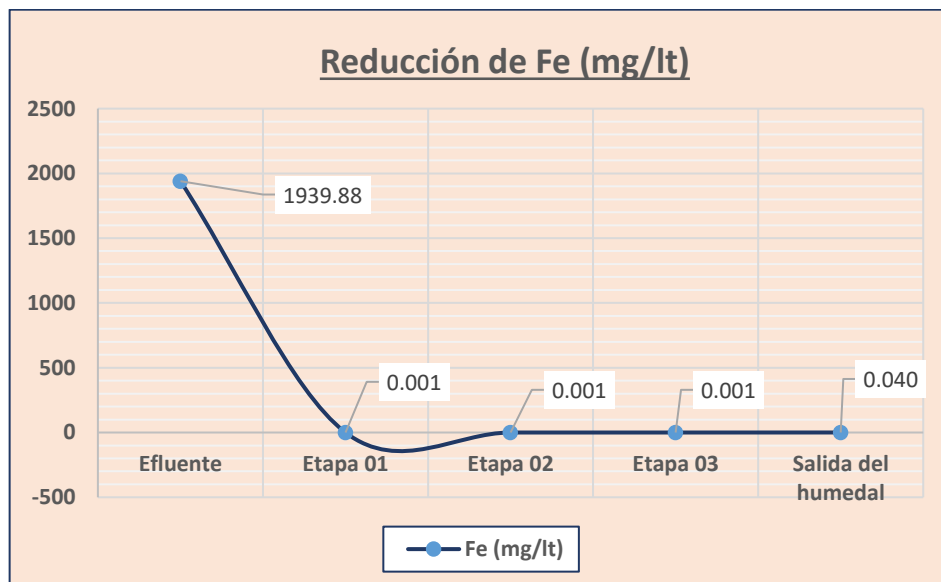
**Tabla N° 04:**

| Fecha: 16/03/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 29°C          | Hr(%) = 48% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,81 | 184,23      | 1939,88     | 580               |
| Etapa 01           |             | 6,87 | 141,45      | 0,001       | 640               |
| Etapa 02           |             | 6,87 | 116,38      | 0,001       | 740               |
| Etapa 03           |             | 6,90 | 81,34       | 0,001       | 220               |
| Salida del humedal |             | 6,91 | 54,15       | 0,040       | 360               |
| Eficiencia (%)     |             |      | 70,61%      | 99,99%      | 37,93%            |

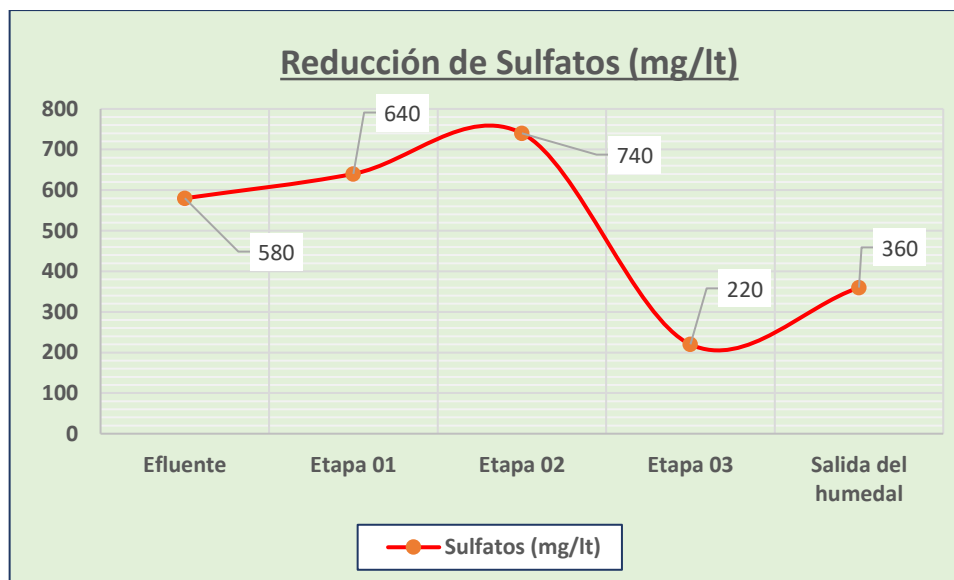
Gráfica N° 10:



Gráfica N° 11:



**Gráfica N° 12:**

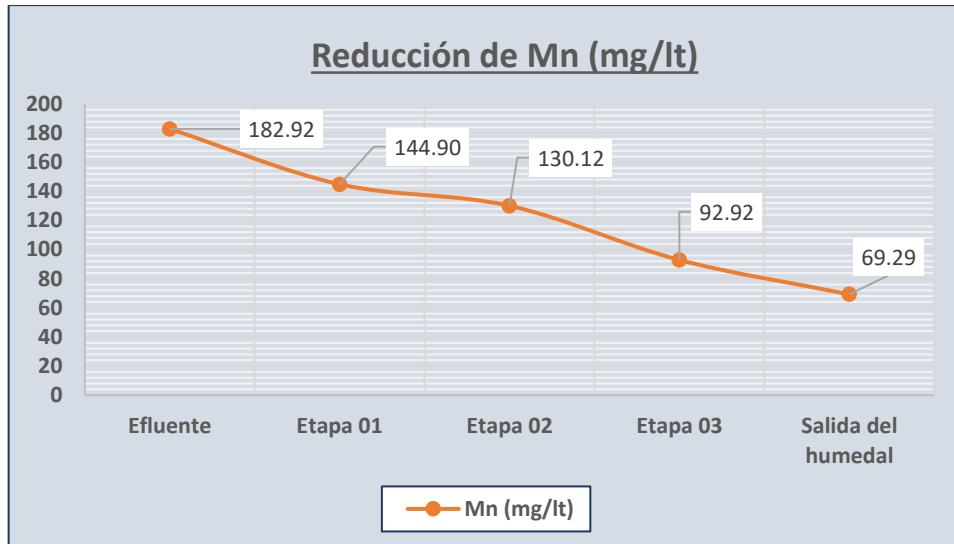


**Tabla N° 05:**

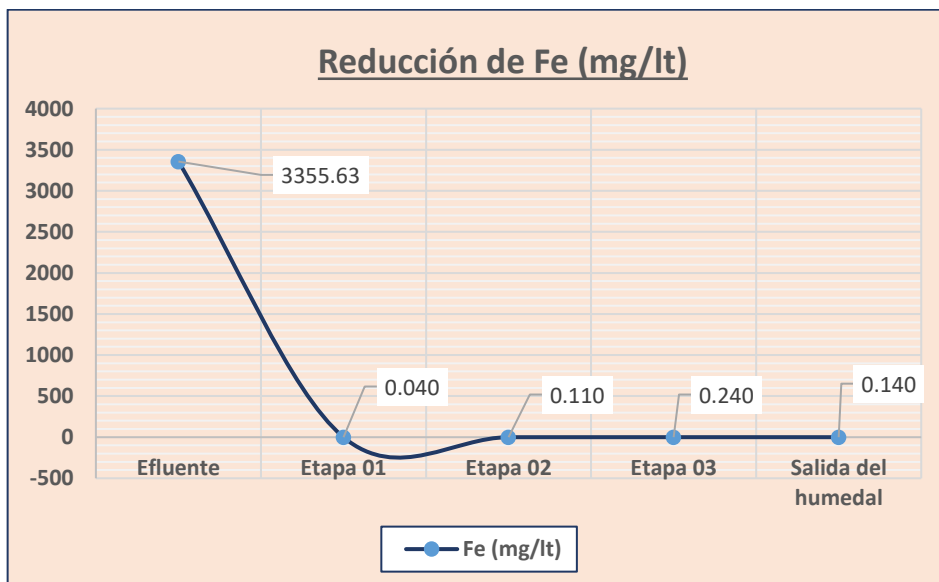
| Fecha: 20/03/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 29°C          | Hr(%) = 40% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 4,96 | 182,92      | 3355,63     | 340               |
| Etapa 01           |             | 6,97 | 144,90      | 0,040       | 960               |
| Etapa 02           |             | 6,93 | 130,12      | 0,110       | 680               |
| Etapa 03           |             | 6,90 | 92,92       | 0,240       | 840               |
| Salida del humedal |             | 6,90 | 69,29       | 0,140       | 540               |
| Eficiencia (%)     |             |      | 62,12%      | 99,99%      | -58,82%           |



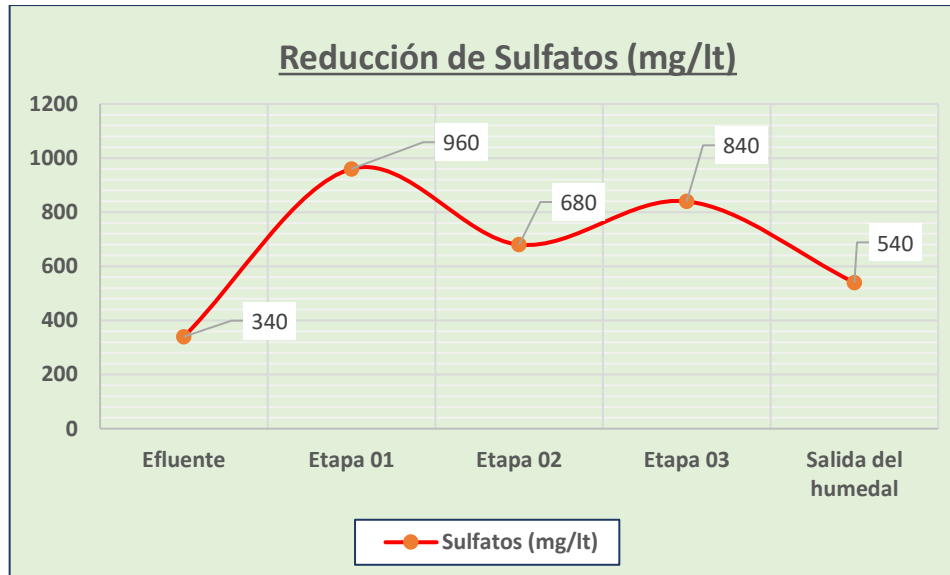
Gráfica N° 13:



Gráfica N° 14:



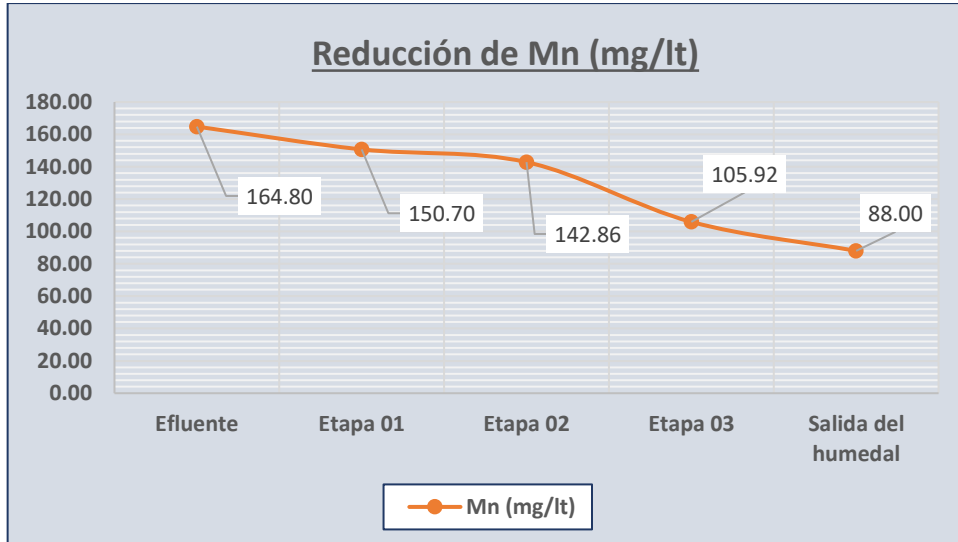
**Gráfica N° 15:**



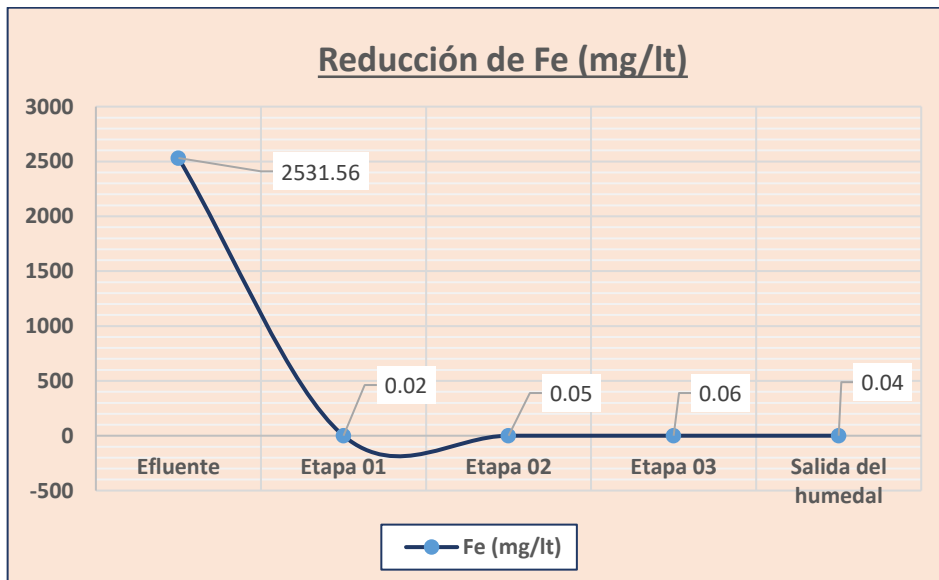
**Tabla N° 06:**

| Fecha: 24/03/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 26°C          | Hr(%) = 45% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 4,30 | 164,80      | 2531,56     | 1220              |
| Etapa 01           |             | 6,56 | 150,70      | 0,02        | 1100              |
| Etapa 02           |             | 6,55 | 142,86      | 0,05        | 1180              |
| Etapa 03           |             | 6,62 | 105,92      | 0,06        | 940               |
| Salida del humedal |             | 6,68 | 88,00       | 0,04        | 980               |
| Eficiencia (%)     |             |      | 46,60%      | 99,99%      | 19,67%            |

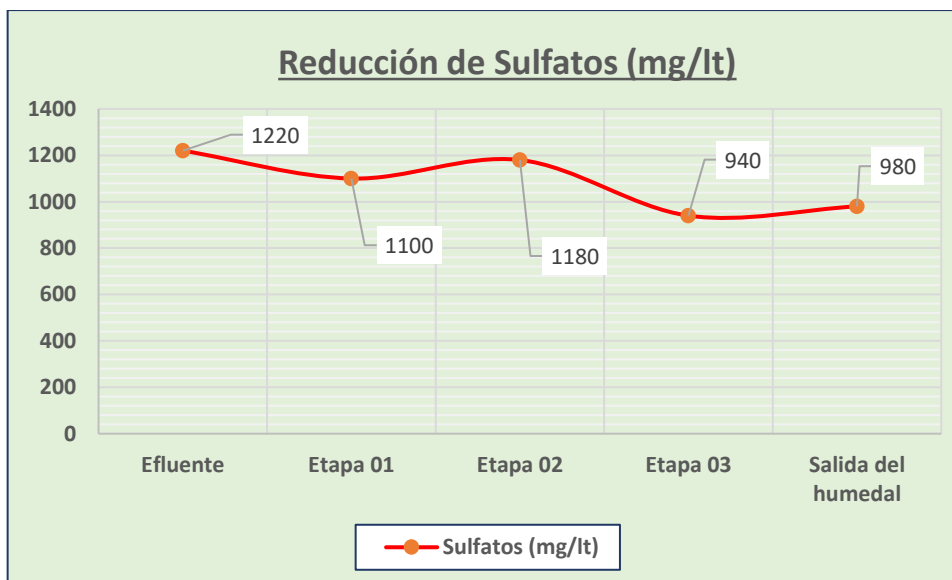
Gráfica N° 16:



Gráfica N° 17:



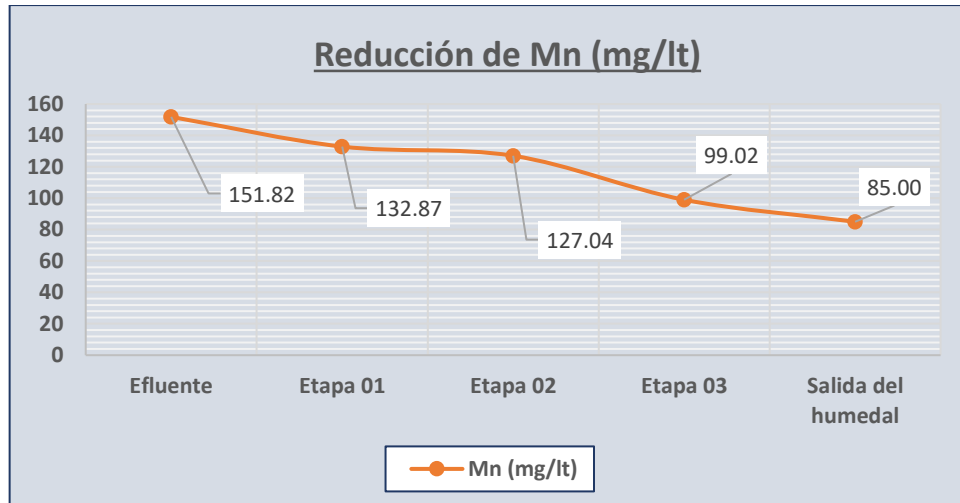
**Gráfica N° 18:**



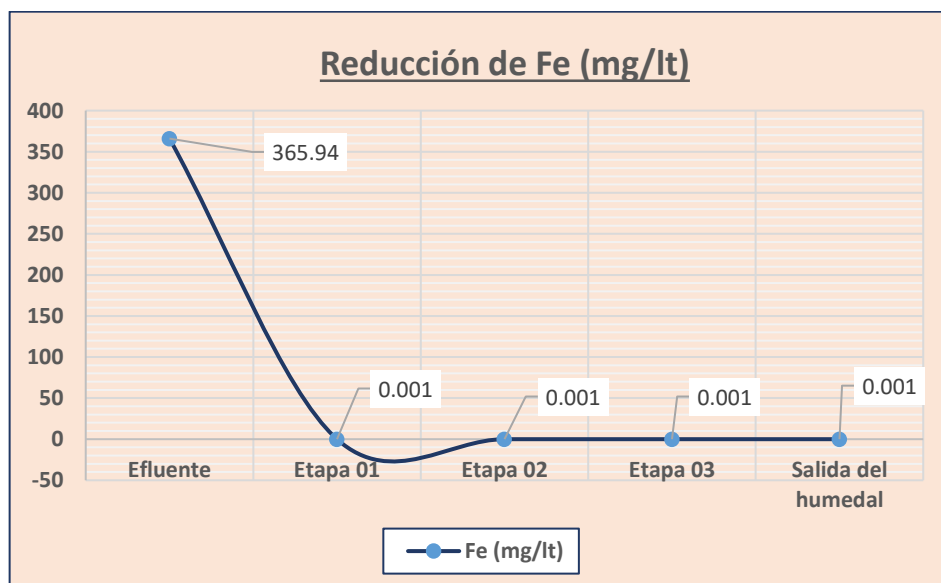
**Tabla N° 07:**

| Fecha: 28/03/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 28°C          | Hr(%) = 45% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,15 | 151,82      | 365,94      | 720               |
| Etapa 01           |             | 6,13 | 132,87      | 0,001       | 960               |
| Etapa 02           |             | 6,32 | 127,04      | 0,001       | 660               |
| Etapa 03           |             | 6,39 | 99,02       | 0,001       | 1200              |
| Salida del humedal |             | 6,39 | 85,00       | 0,001       | 960               |
| Eficiencia (%)     |             |      | 44,01%      | 99,99%      | -33,33%           |

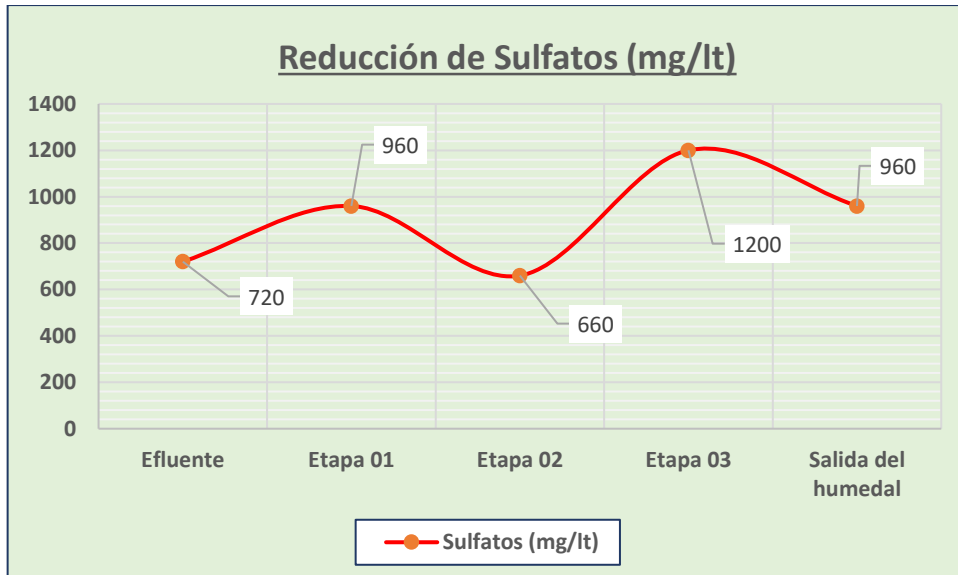
Gráfica N° 19:



Gráfica N° 20:



**Gráfica N° 21:**



#### 4.2 PROCESO DE TRATAMIENTO Y TOMA DE MUESTRAS: MES DE ABRIL

**1. Fechas para la toma de muestras:**

Del 05 al 30 de abril del 2018

**2. Tiempo de retención propuesto:**

5.0 días

**3. Caudal promedio de ingreso al humedal:**

19 ml/min

**4. Metodología elegida para determinar la concentración de cada elemento en la muestra:**

- **Fierro:** absorción atómica
- **Manganeso:** absorción atómica
- **Sulfatos:** gravimetría

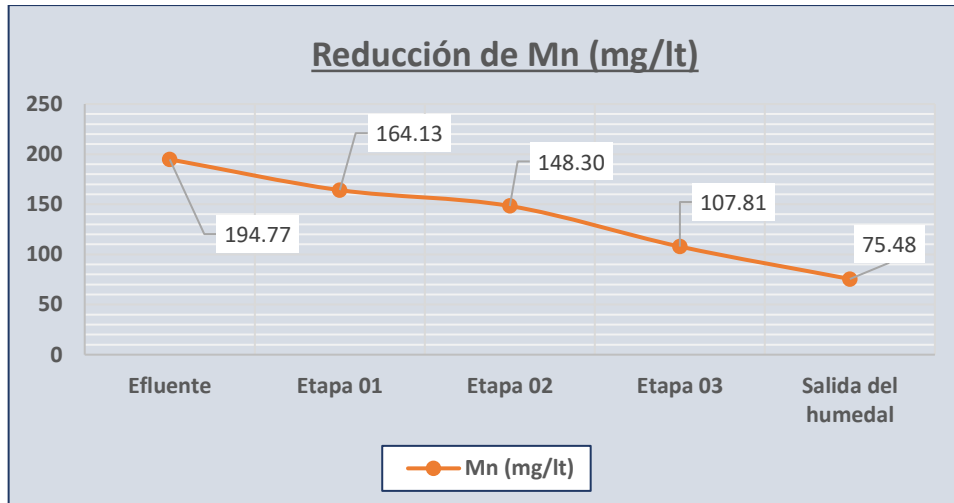
**5. Método de medición de la eficiencia:**

Reducción porcentual -  $[C_{in}-C_{out}/C_{in}] \times 100\%$

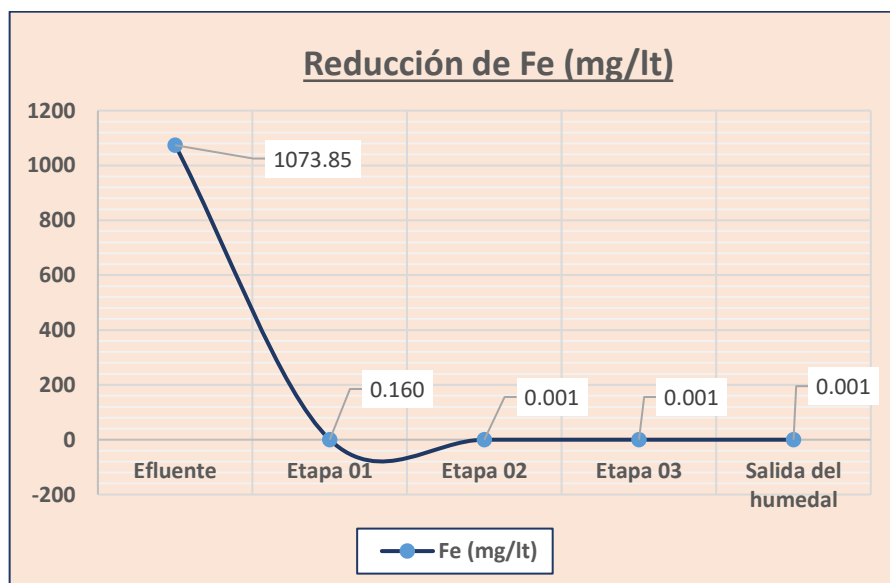
**Tabla N° 08:**

| Fecha: 05/04/2018  |             |      |           |           |                 |
|--------------------|-------------|------|-----------|-----------|-----------------|
| T° = 26°C          | Hr(%) = 46% | pH   | Mn (mg/l) | Fe (mg/l) | Sulfatos (mg/l) |
| Tipo de Muestra    |             |      |           |           |                 |
| Efluente           |             | 5,84 | 194,77    | 1073,85   | 1040            |
| Etapa 01           |             | 6,70 | 164,13    | 0,160     | 1160            |
| Etapa 02           |             | 6,71 | 148,30    | 0,001     | 1080            |
| Etapa 03           |             | 6,71 | 107,81    | 0,001     | 1180            |
| Salida del humedal |             | 6,82 | 75,48     | 0,001     | 1300            |
| Eficiencia (%)     |             |      | 61,25%    | 99,99%    | -25,00%         |

**Gráfica N° 22:**

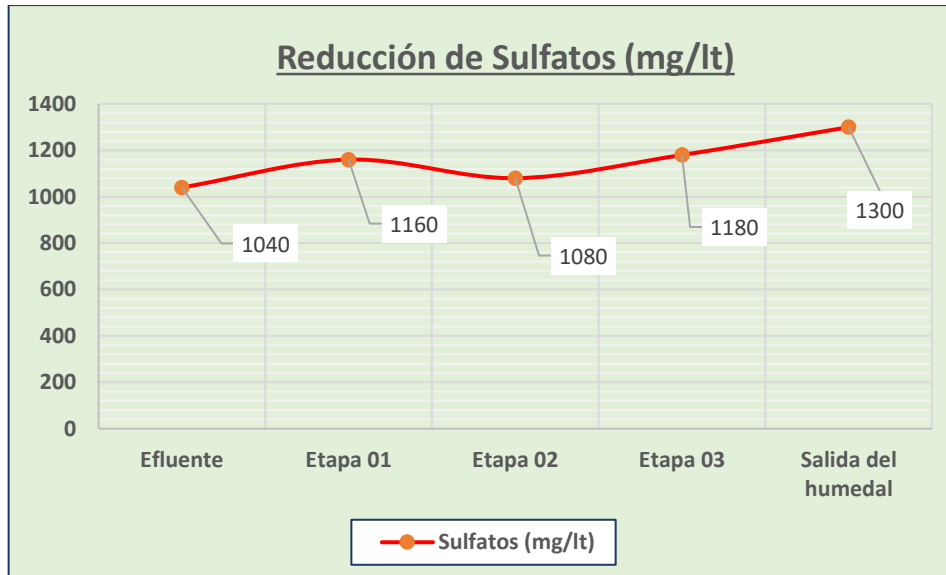


**Gráfica N° 23:**





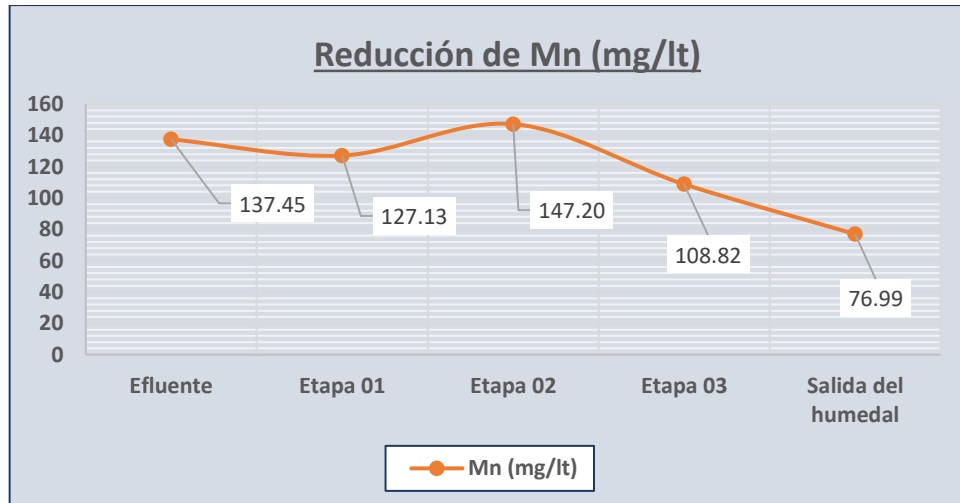
**Gráfica N° 24:**



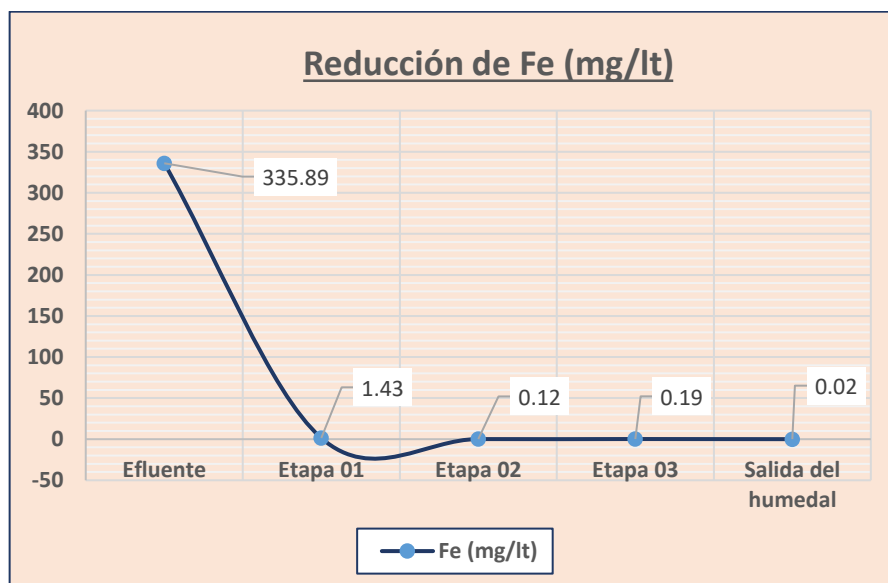
**Tabla N° 09:**

| Fecha: 10/04/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 28°C          | Hr(%) = 44% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,62 | 137,45      | 335,89      | 1040              |
| Etapa 01           |             | 6,95 | 127,13      | 1,43        | 1260              |
| Etapa 02           |             | 6,89 | 147,20      | 0,12        | 1420              |
| Etapa 03           |             | 6,86 | 108,82      | 0,19        | 1480              |
| Salida del humedal |             | 6,84 | 76,99       | 0,02        | 1220              |
| Eficiencia (%)     |             |      | 43,99%      | 99,99%      | -17,31%           |

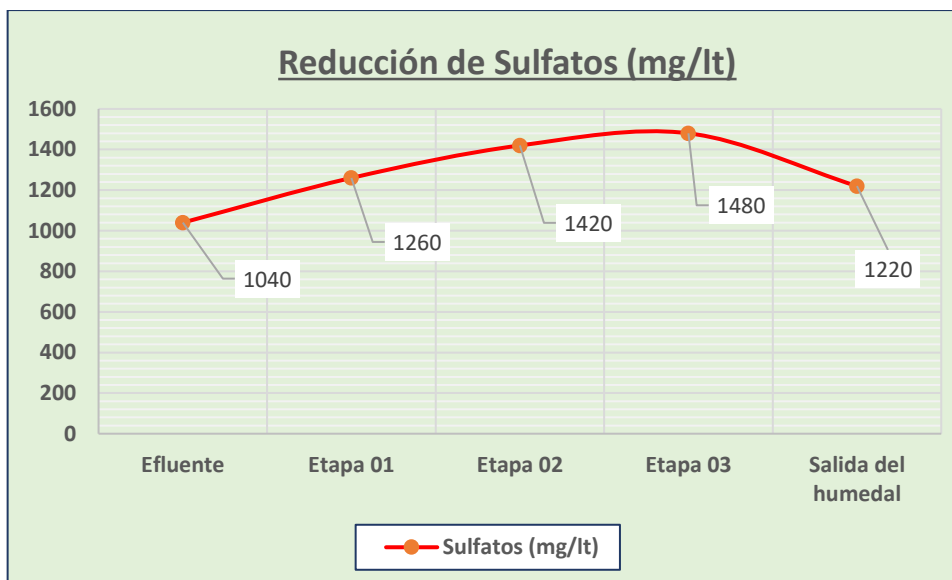
**Gráfica N° 25:**



**Gráfica N° 26:**



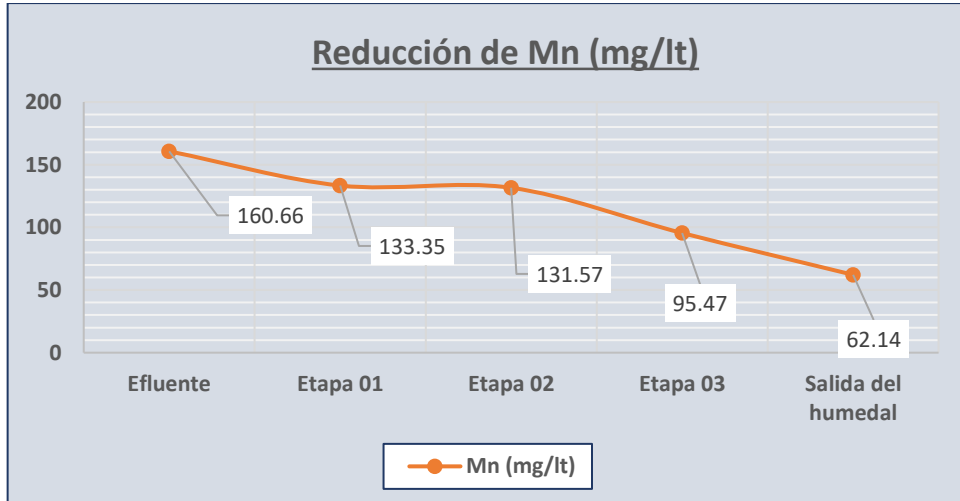
**Gráfica N° 27:**



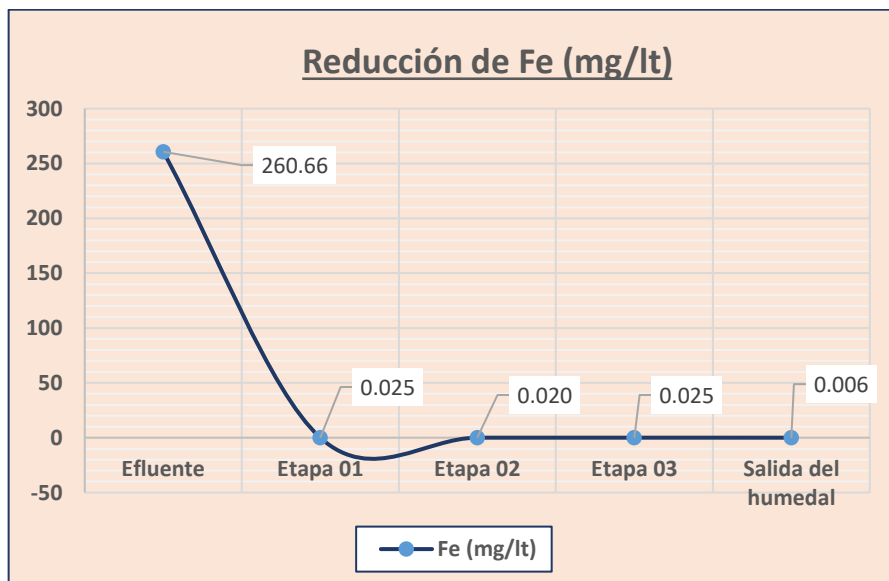
**Tabla N° 10:**

| Fecha: 15/04/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 29°C          | Hr(%) = 52% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,35 | 160,66      | 260,66      | 1040              |
| Etapa 01           |             | 6,43 | 133,35      | 0,025       | 1100              |
| Etapa 02           |             | 6,53 | 131,57      | 0,020       | 1220              |
| Etapa 03           |             | 6,60 | 95,47       | 0,025       | 1300              |
| Salida del humedal |             | 6,61 | 62,14       | 0,006       | 1220              |
| Eficiencia (%)     |             |      | 61,32%      | 99,99%      | -17,31%           |

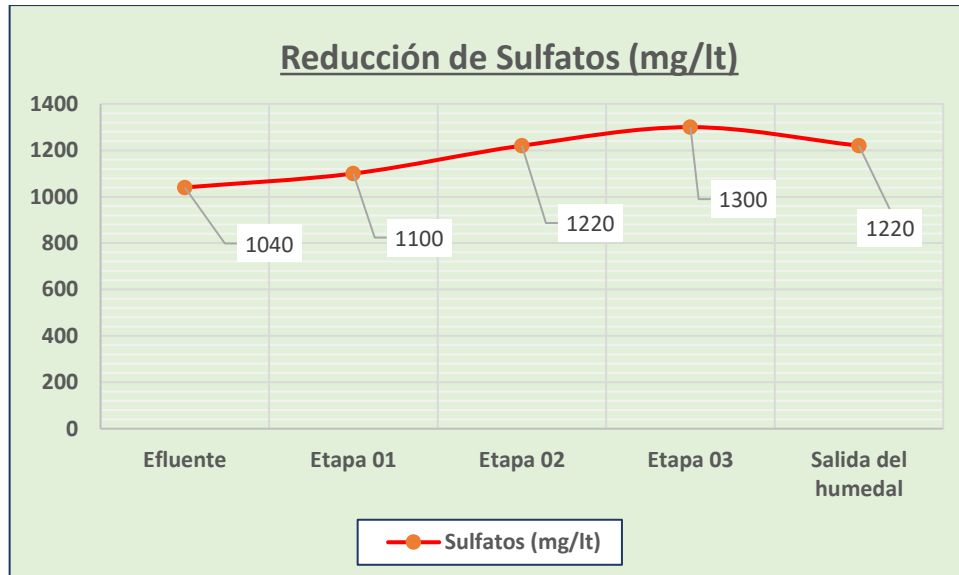
**Gráfica N° 28:**



**Gráfica N° 29:**



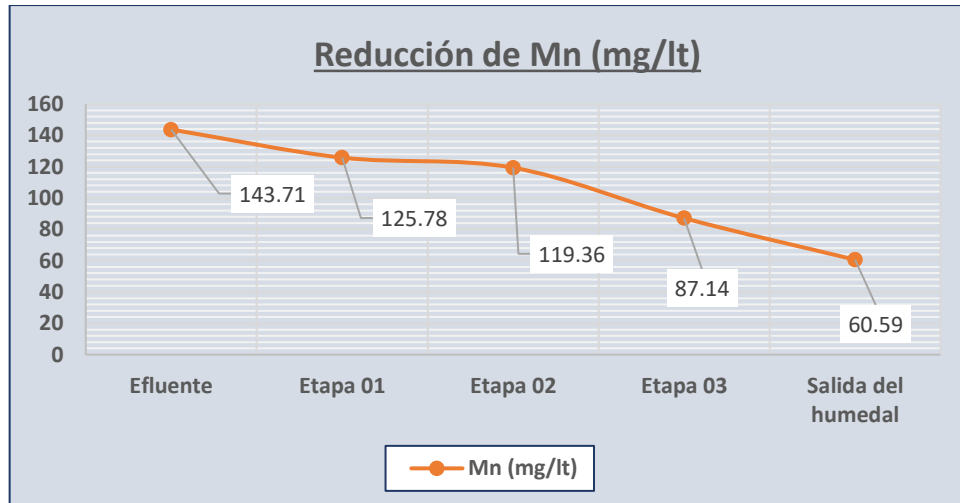
**Gráfica N° 30:**



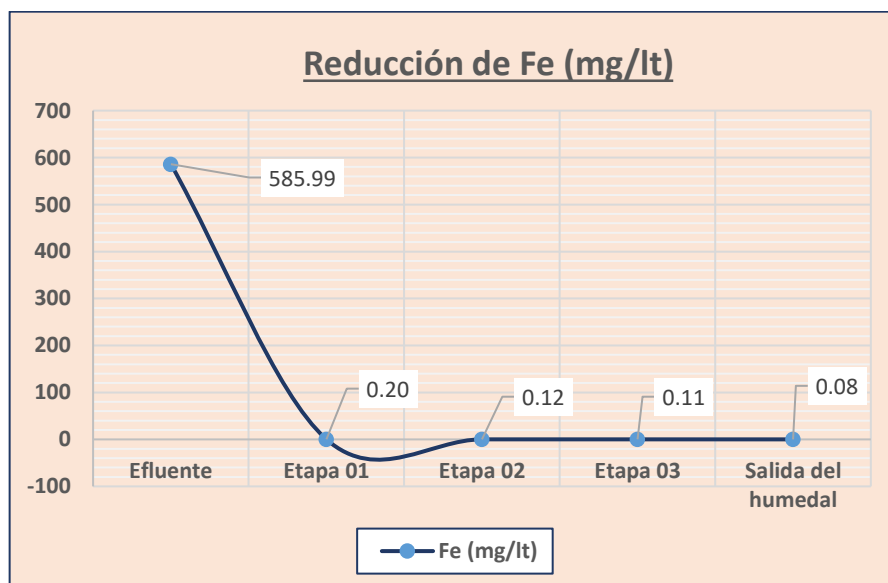
**Tabla N° 11:**

| Fecha: 20/04/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 28 °C         | Hr(%) = 48% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,24 | 143,71      | 585,99      | 1380              |
| Etapa 01           |             | 6,65 | 125,78      | 0,20        | 1220              |
| Etapa 02           |             | 6,67 | 119,36      | 0,12        | 1100              |
| Etapa 03           |             | 6,68 | 87,14       | 0,11        | 1320              |
| Salida del humedal |             | 6,56 | 60,59       | 0,08        | 1300              |
| Eficiencia (%)     |             |      | 57,84%      | 99,99%      | 5,80%             |

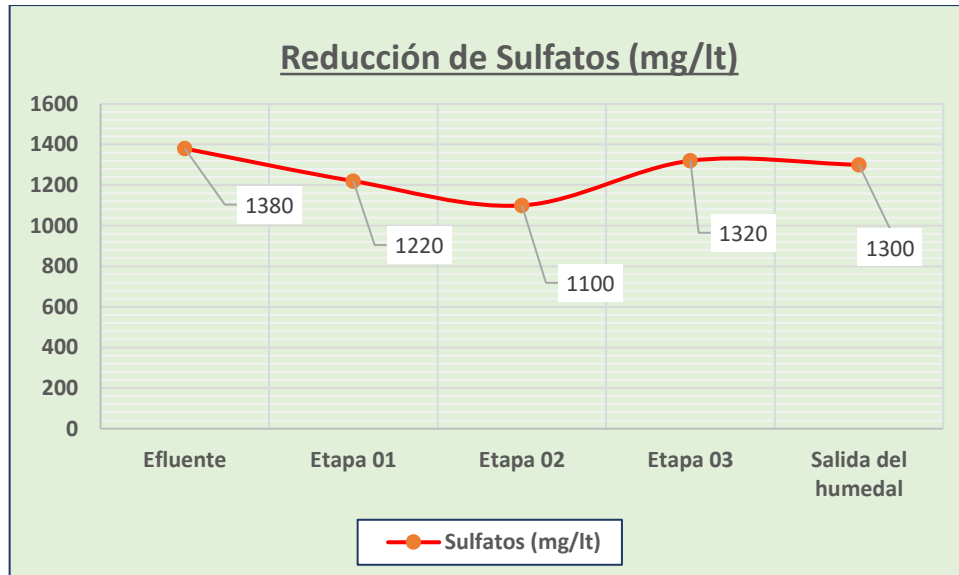
Gráfica N° 31:



Gráfica N° 32:



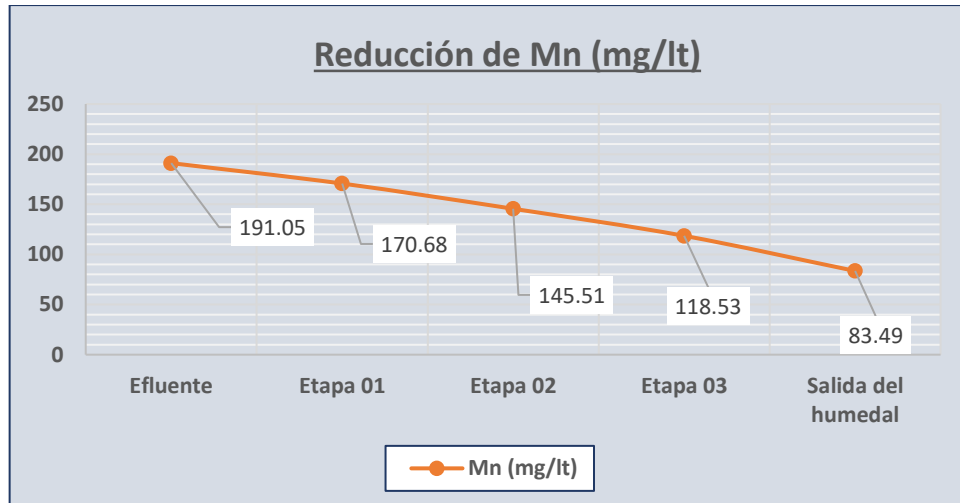
**Gráfica N° 33:**



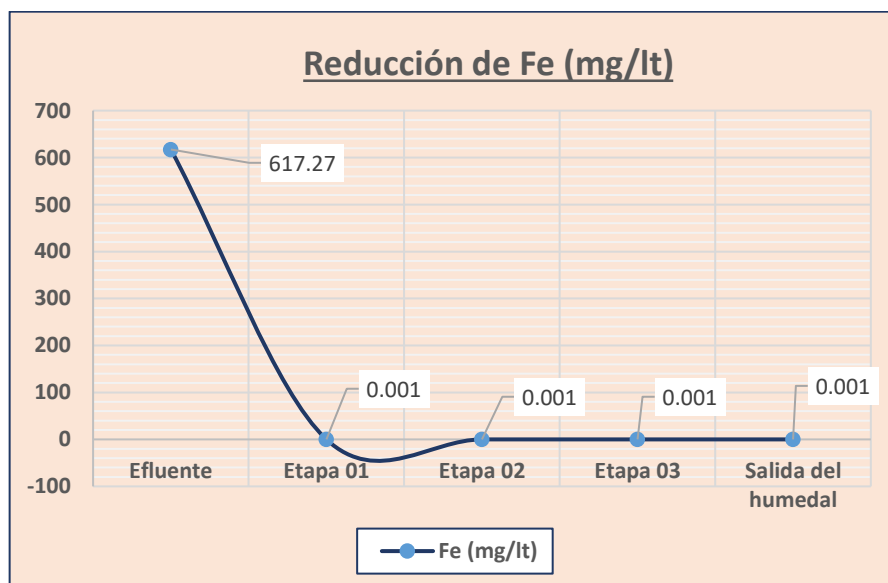
**Tabla N° 12:**

| Fecha: 25/04/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 28°C          | Hr(%) = 48% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,40 | 191,05      | 617,27      | 1220              |
| Etapa 01           |             | 6,78 | 170,68      | 0,001       | 1320              |
| Etapa 02           |             | 6,78 | 145,51      | 0,001       | 1220              |
| Etapa 03           |             | 6,75 | 118,53      | 0,001       | 1040              |
| Salida del humedal |             | 6,70 | 83,49       | 0,001       | 1280              |
| Eficiencia (%)     |             |      | 56,30%      | 99,99%      | -4,92%            |

Gráfica N° 34:

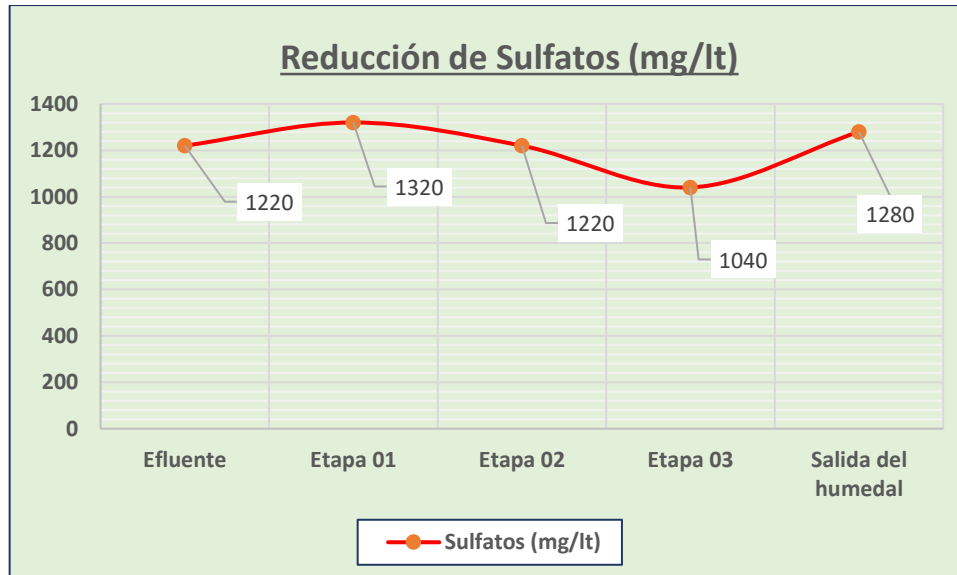


Gráfica N° 35:





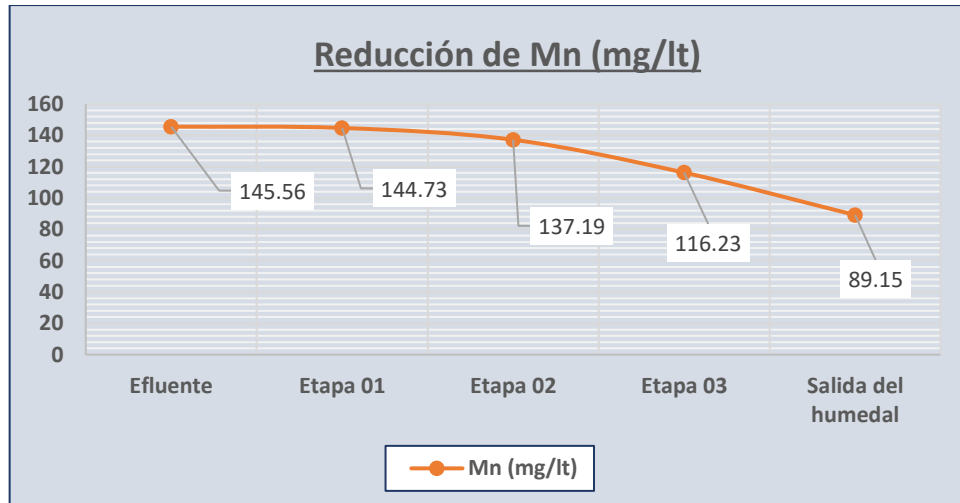
**Gráfica N° 36:**



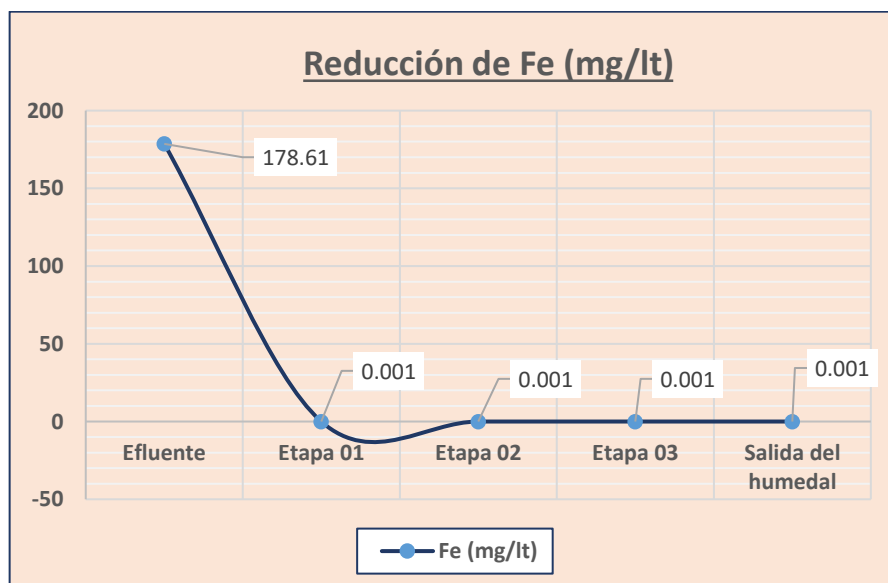
**Tabla N° 13:**

| Fecha: 30/04/2018  |             |      |             |             |                   |
|--------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------------|
| T° = 24°C          | Hr(%) = 61% | pH   | Mn (mg/lit) | Fe (mg/lit) | Sulfatos (mg/lit) |
| Tipo de Muestra    |             |      |             |             |                   |
| Efluente           |             | 5,50 | 145,56      | 178,61      | 1220              |
| Etapa 01           |             | 6,77 | 144,73      | 0,001       | 1300              |
| Etapa 02           |             | 6,71 | 137,19      | 0,001       | 1360              |
| Etapa 03           |             | 6,70 | 116,23      | 0,001       | 1330              |
| Salida del humedal |             | 6,75 | 89,15       | 0,001       | 1310              |
| Eficiencia (%)     |             |      | 38,75%      | 99,99%      | -7,38%            |

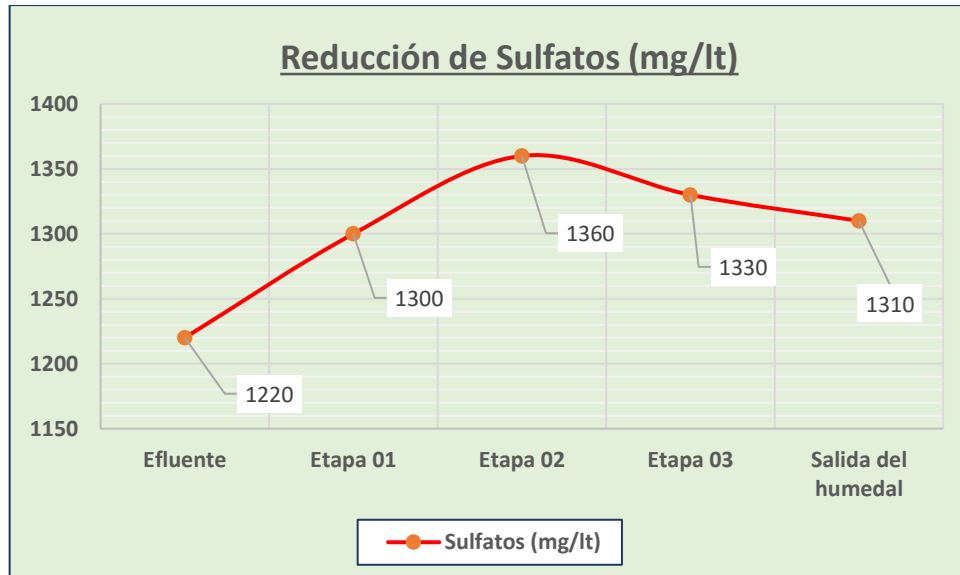
**Gráfica N° 37:**



**Gráfica N° 38:**



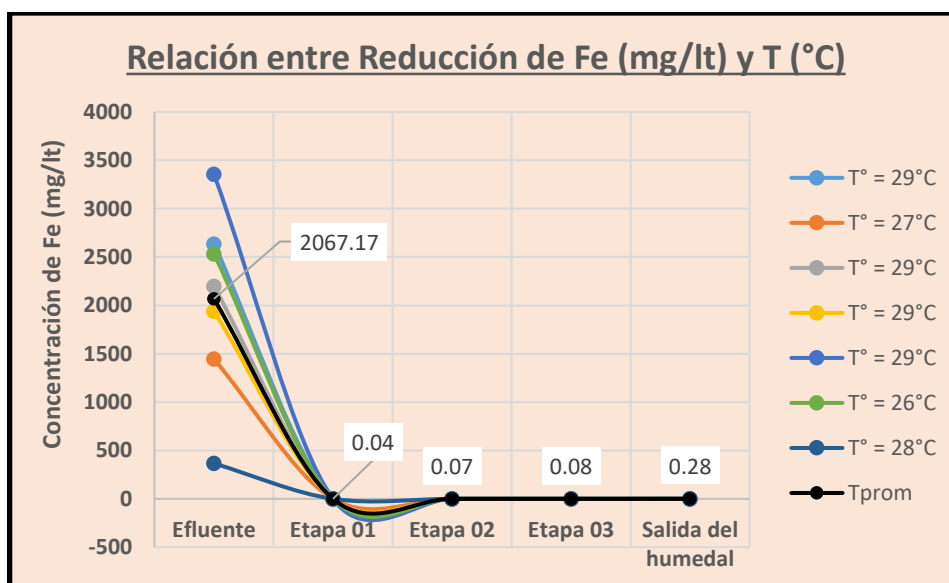
**Gráfica N° 39:**



### 4.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS:

#### 4.3.1 GRÁFICOS QUE RELACIONA LA REDUCCIÓN DE METALES Y SULFATOS CON RESPECTO A LA TEMPERATURA PROMEDIO: MES DE MARZO

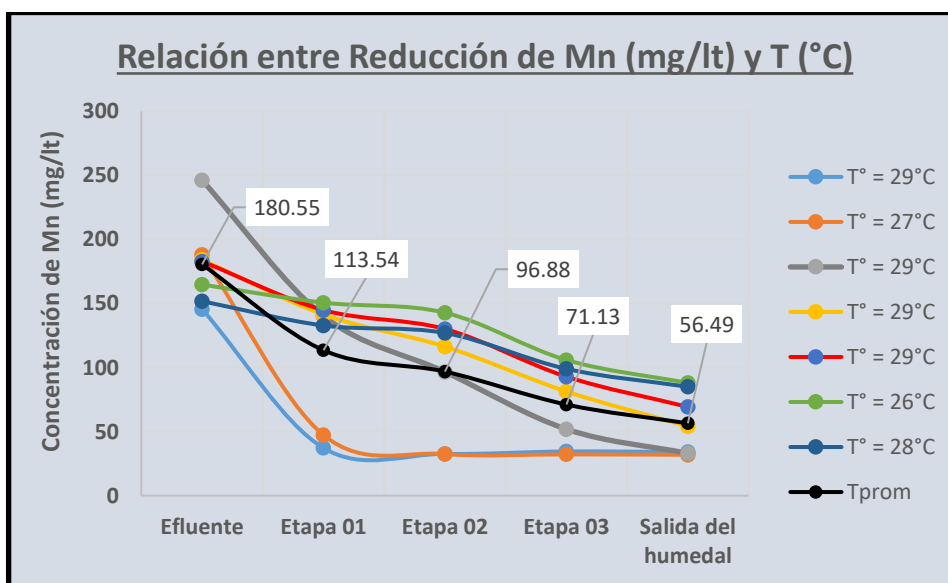
Gráfica N° 40:



De acuerdo con la gráfica N° 40, la serie de curvas expuestas indican que desde la primera etapa se ha logrado la remoción, prácticamente total, del hierro disuelto (99.99%). A lo largo de la investigación la muestra que ingresa al humedal presenta una turbiedad de 1.0 UNT, (tal como se muestra en la Imagen N° 14 del panel fotográfico) lo cual nos indica que posiblemente la reducción por sedimentación no sea lo que predomine en el tratamiento siendo, además, la presencia de sulfatos lo que permite que bajo estas circunstancias el hierro siempre se presente en su forma reducida más soluble. A su vez, un pH ácido en el medio de tratamiento también contribuye directamente con la absorción del hierro por parte de la vegetación, ya que en un medio básico el hierro se vuelve insoluble y, por ende, dificulta la adecuada absorción por las plantas. De acuerdo con lo anterior la *Dracaena Sanderiana* podría presentar un gran potencial en sus raíces para fijar y acumular el hierro por adsorción y puede ser uno de los

motivos por lo que la especie se ha mantenido estable durante todo el proceso de pruebas efectivas, gracias al consumo de hierro, y es que al ser uno de los principales micronutrientes de las plantas, este cumple funciones importantes en su desarrollo.

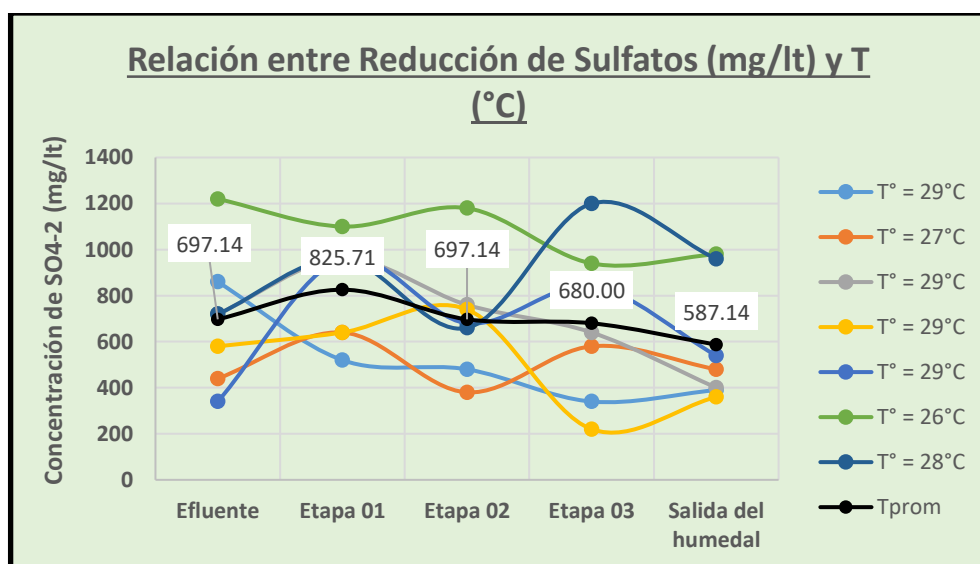
**Gráfica N° 41:**



Como se aprecia en la serie de curvas, las dos primeras tomas de muestra presentan una reducción inmediata de manganeso desde su ingreso a la Etapa 01, para luego estabilizarse y mantener una tendencia claramente visible. El resto de curvas tienden a acercarse. Para la curva promedio desde el ingreso al humedal a la etapa 01 se ha removido 37.11%, de la etapa 01 a la etapa 02 se ha removido 14.67% de la etapa 02 a la etapa 03 se ha removido 26.58%, de la etapa 03 a la salida del humedal se ha removido 20.58%. A pesar de que se ha logrado remover todo el hierro, la concentración de manganeso, para este mes, ha presentado una reducción porcentual mínima de 44.01% y máxima de 86.61%, lo cual nos indica que se requiere mayor tiempo de contacto para su eliminación. Es poco probable que la oxidación química del Mn haya sido lo que predomine en el tratamiento, ya que esta es cinéticamente lenta y por lo tanto, se requiere un pH más elevado de lo que se ha presentado para lograr su

precipitación. La presencia de sulfatos permite que bajo estas circunstancias el manganeso siempre se presente en su forma reducida más soluble y además del hierro, el manganeso es también otro micronutriente que las plantas requieren para su desarrollo, pero en un medio con niveles de pH por debajo de 5.5, el manganeso se vuelve altamente soluble, y esto se refleja en las quemaduras que se presentaron en las puntas de las hojas más viejas, síntoma de intoxicación, con lo cual es probable que la especie haya recibido un exceso de nutrientes.

Gráfica N° 42:

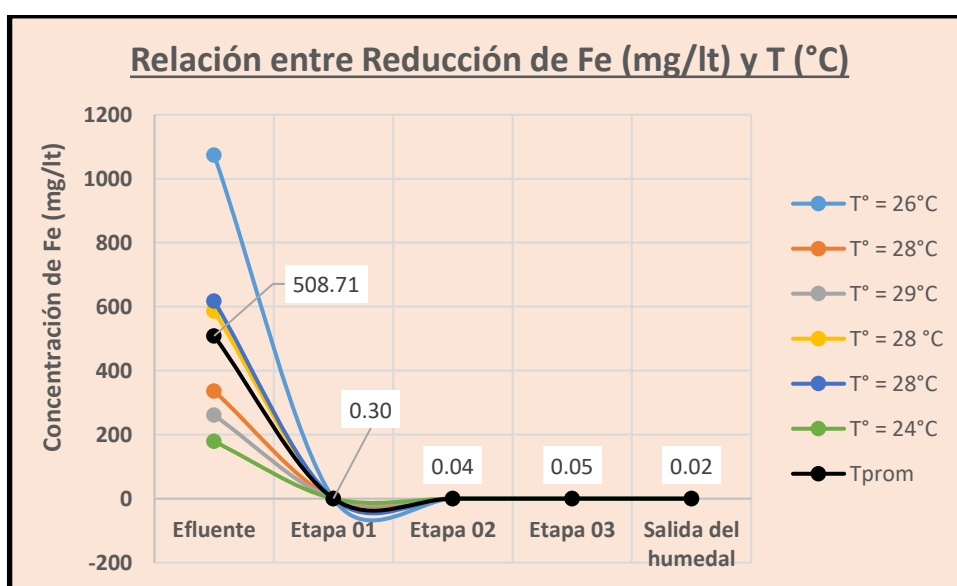


Se observan puntos muy dispersos en este mes de prueba, las variaciones en la concentración de sulfatos posiblemente se deben al margen de error que tiene la prueba de determinación por gravimetría, en todo caso, si consideramos la reducción de sulfatos en el humedal como elemento traza del proceso, esto va de la mano con el proceso de remoción del manganeso, el cual sólo se logró eliminar parcialmente. A pesar de estos resultados, la variable pH se ha incrementado hasta conseguir una condición casi neutral en todas las muestras tomadas, es probable que esta variación tenga relación directa con la reducción de manganeso, por ser el único metal que se ha removido en forma gradual a lo

largo del tratamiento. La presencia permanente de sulfatos en todas las etapas del humedal es la variable que permite al Fe y Mn presentarse, probablemente, en sus formas reducidas más solubles, predominantemente.

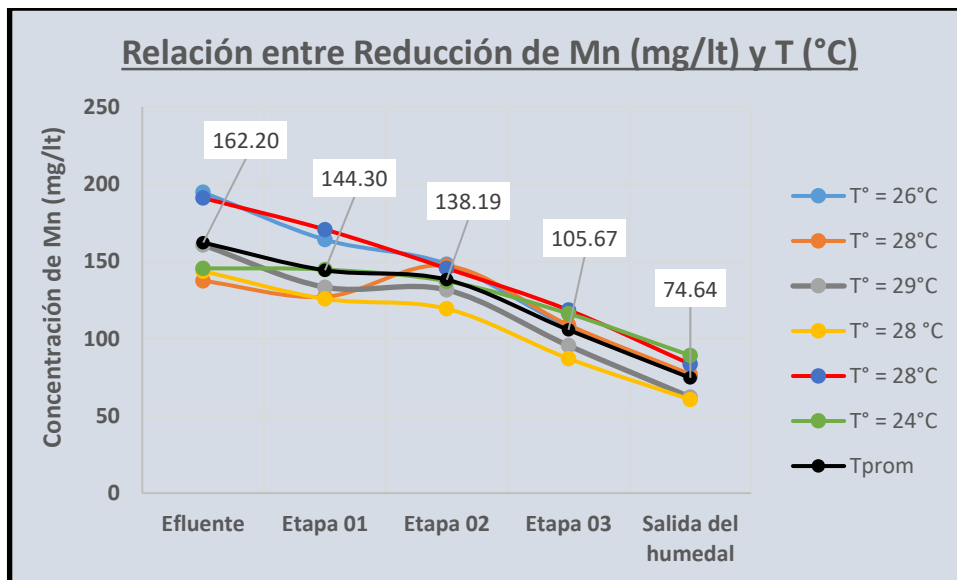
#### 4.3.2 GRÁFICOS QUE RELACIONA LA REDUCCIÓN DE METALES Y SULFATOS CON RESPECTO A LA TEMPERATURA PROMEDIO: MES DE ABRIL

Gráfica N° 43:



En la serie de curvas expuestas, se observa que se ha logrado la oxidación y remoción, prácticamente total (99.99%), del hierro contenido en las muestras desde el primer compartimento, y la tendencia se ha mantenido a lo largo de los 02 meses de pruebas efectivas, con tiempos de retención mucho menores a los propuestos como 04 y 05 días, la remoción de carga es prácticamente inmediata y todo esto se genera en la Etapa 01 del humedal. Se ha observado una buena capacidad de resistencia a la toxicidad del hierro por parte la Dracaena Sanderiana, teniendo en cuenta que en la mayoría de especies de plantas los contenidos con que son afectadas están entre 300-2500 mgFe/lit, como los que se presentan al ingreso del humedal en ambos meses.

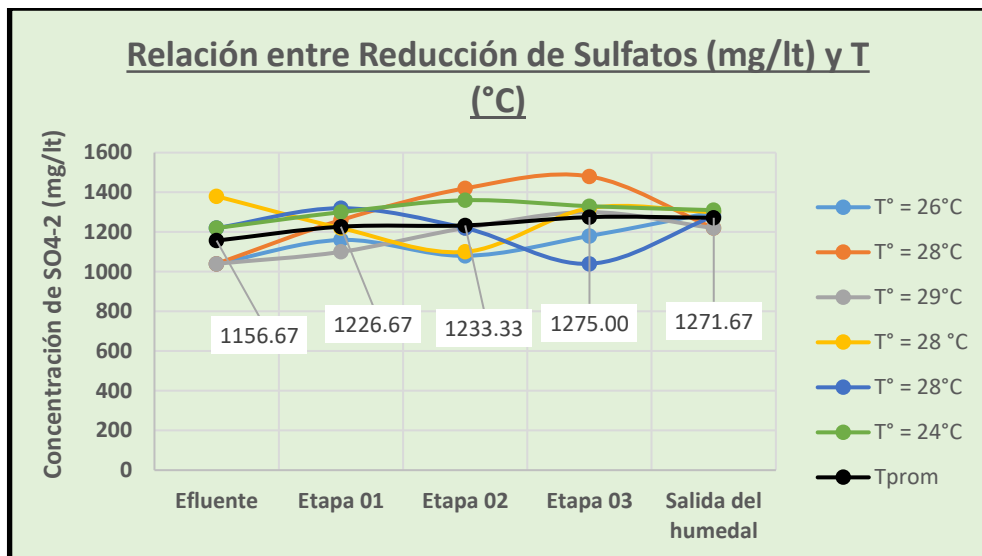
Gráfica N° 44:



En la serie de curvas expuestas, se aprecia una clara tendencia o estabilidad en el proceso de reducción de la concentración de manganeso. Para la curva promedio desde el ingreso al humedal a la etapa 01 se ha removido 11.04%, de la etapa 01 a la etapa 02 se ha removido 4.23%, de la etapa 02 a la etapa 03 se ha removido 23.53%, de la etapa 03 a la salida del humedal se ha removido 29.37%. A pesar de que se ha logrado remover todo el hierro, la concentración de manganeso ha presentado, para este mes de pruebas efectivas, una reducción porcentual mínima y máxima de 38.75% y 61.32% respectivamente, con estos resultados se confirma que la metodología propuesta elimina parcialmente la concentración de manganeso en tiempos de retención de 04 y 05 días. La especie siguió presentando quemaduras en los bordes de las hojas, producto de la intoxicación por manganeso, pero sin desestabilizar su desarrollo y proliferación.



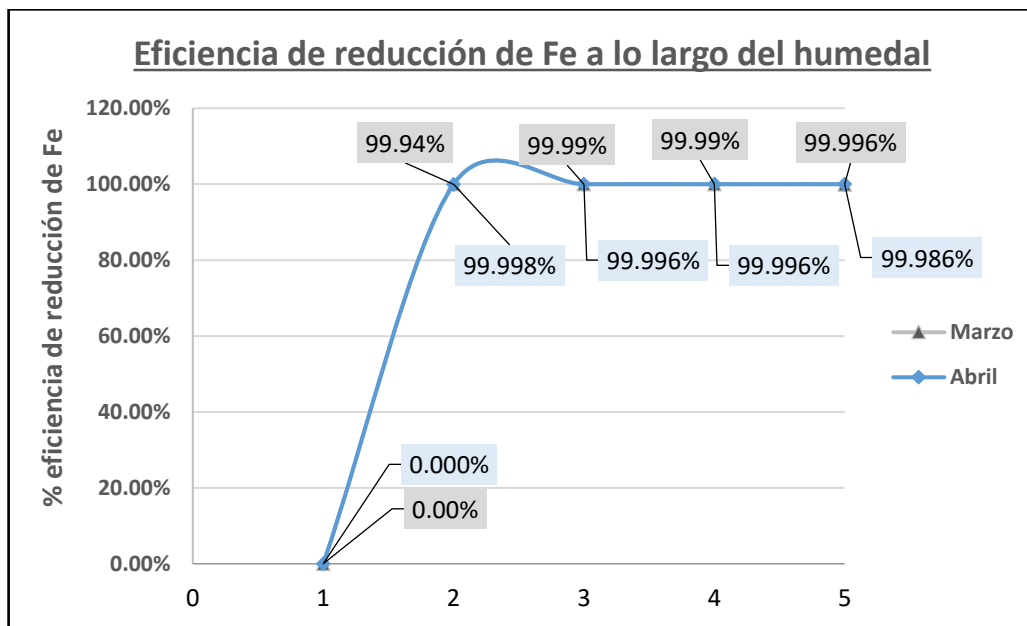
Gráfica N° 45:



Se puede visualizar una tendencia más estable en la serie de curvas en comparación al mes anterior, la dispersión de puntos es más cercana, por lo tanto, las curvas tienden a juntarse. En dicha tendencia se observa que el humedal prácticamente no ha removido la concentración de sulfatos desde el inicio hasta el final del humedal, siendo posible la acumulación de sulfatos en los últimos compartimentos. Estos resultados reflejan la falta de influencia de un medio anaeróbico generador de bacterias sulforreductoras. A pesar de los resultados poco favorables, y teniendo en cuenta que la variable pH está muy ligada al proceso de reducción de sulfatos, en esta etapa también se ha logrado disminuir la acidez del medio, hasta un punto casi neutro en todas las muestras tomadas.

### 4.3.3 GRÁFICA QUE RELACIONA LA EFICIENCIA EN REDUCCIÓN DE FIERRO CON LAS ETAPAS DEL HUMEDAL EN LOS 02 MESES

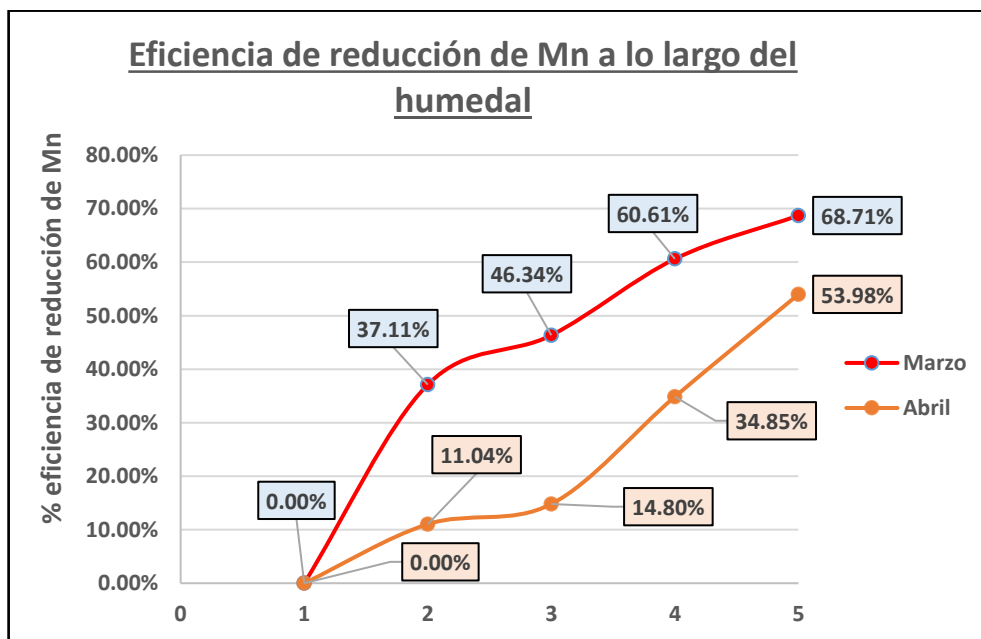
Gráfica N° 46:



La grafica N° 46 muestra la eficiencia de reducción de hierro promedio, a lo largo del proceso para cada mes de pruebas efectivas respectivamente. El primer mes de prueba nos indica que desde la primera etapa ya se ha alcanzado el 99.99% en reducción de hierro, estos resultados son reiterativos para el segundo mes de pruebas efectivas, lo que nos confirma que sólo es necesario una etapa para la remoción casi total de hierro disuelto, en un humedal elaborado con la especie *Dracaena Sanderiana* como vegetación.

#### 4.3.4 GRÁFICA QUE RELACIONA LA EFICIENCIA EN REDUCCIÓN DE MANGANESO CON LAS ETAPAS DEL HUMEDAL EN LOS 02 MESES

Gráfica N° 47:



La grafica N° 47 muestra la eficiencia en la reducción de manganeso promedio, a lo largo del proceso para cada mes de pruebas efectivas respectivamente. Según antecedentes, el hierro y manganeso se remueven en forma secuencial, ya que el manganeso es sensible a la presencia de fierro, esto podría impedir la reducción del mismo, por lo tanto, es probable que sea el motivo por el cual se puede apreciar una eficiencia de reducción en forma progresiva, en los 02 meses de pruebas efectivas. Para este metal sólo se logra la reducción, mas no se logra la remoción como en el caso del hierro, posiblemente esto se debe a la falta de un medio cuyas condiciones de pH sean alcalinas donde el manganeso se vuelve insoluble.

## CONCLUSIONES

1. De acuerdo con la hipótesis en cuestión, un tratamiento pasivo por medio de humedales artificiales puede arrojar resultados favorables en cuanto a reducción de concentración de metales contenidos en aguas ácidas, no siendo en el caso de los sulfatos cuya concentración se mantuvo estable en todo el proceso. Una restricción para este método es que sólo opera bajo condiciones de caudales relativamente pequeños y afloramientos naturales.
2. Los resultados obtenidos han arrojado valores muy favorables en cuanto a reducción de concentración de fierro, comprobando así la alta efectividad de un humedal artificial con la especie *Dracaena Sanderiana* para la remoción de dicho metal contenido en una muestra de aguas ácidas; en cuanto al manganeso es, tal como nos lo describen los antecedentes, el metal más difícil de eliminar. Los resultados obtenidos nos muestran, para el mes de marzo con un tiempo de retención de 04 días, que la concentración de manganeso ha disminuido entre un mínimo y un máximo de 44.01% y 86.61% respectivamente, y para el mes de abril con un tiempo de retención de 05 días, la concentración de manganeso ha disminuido entre un mínimo y un máximo de 38.75% y 61.32% respectivamente.
3. No se observó una tendencia en las curvas, ni hubo una reducción significativa en la concentración de sulfatos, sin embargo, la presencia de sulfatos permite que bajo estas circunstancias el hierro y manganeso siempre se presenten en su forma reducida más soluble, siendo probablemente un indicador de que el porcentaje de reducción de metales obtenido sea debido a los procesos de adsorción de las raíces, lo cual no se determinó experimentalmente por no ser parte del alcance de esta investigación, a su vez, un pH ácido en el medio de tratamiento también contribuye directamente con la absorción de ambos metales por parte de la vegetación, ya que en un medio básico hierro y manganeso se vuelven insolubles y, por ende, dificulta la adecuada absorción por las plantas; en el caso del Mn es poco probable que la oxidación química haya sido lo que predomine en el tratamiento, ya que esta es cinéticamente lenta y por lo tanto, se requiere un pH más elevado de lo que se ha presentado para lograr su precipitación, por último el buen grado de adaptación y

proliferación de la especie hace suponer que esta ha logrado asimilar una gran cantidad de ambos metales como nutrientes.

4. A pesar de no encontrarse una relación directa entre cada curva de reducción y la temperatura promedio del día, cabe la posibilidad de que los resultados obtenidos con la metodología propuesta sean los más favorables, ya que la investigación se realizó en los meses más calurosos del año, siendo fundamental el factor temperatura para el proceso de tratamiento por humedales. A su vez, en el segundo mes de pruebas efectivas, la temperatura no influyó drásticamente en los resultados obtenidos.
5. Es conocido que la especie *Dracaena Sanderiana* tiene un desempeño adecuado en el tratamiento de desagües domésticos, pero la presente investigación ha dejado en claro que también puede resultar útil en el tratamiento de aguas ácidas.

## RECOMENDACIONES

1. Debido a los complejos procesos del agua y la cantidad de variables físicas, químicas y biológicas que encierra el proceso, es posible optar por diversas configuraciones hidráulicas para evitar zonas muertas, o un flujo intermitente del agua a tratar, elegir diversos tipos de sustrato, inclusive de forma mixta, además de otros tipos de vegetación, que soporten condiciones extremas de clima, altura, así como la falta o exceso del líquido elemento.
1. Para evitar un cambio drástico en los resultados del tratamiento, es necesario que la muestra de drenaje ácido minero artificial sea elaborada con reactivos de calidad con sus respectivas certificaciones, de preferencia de la misma marca en todo el proceso. Se debe tener en cuenta el cuidado durante su uso en el proceso de investigación, siendo estos colocados en un lugar fresco y seco.
2. Para la configuración adoptada donde se han evitado los espacios muertos, es recomendable incrementar la densidad de plantas en el sustrato, ya que se ha observado que dicha vegetación prolifera en el mismo espacio, mas no se distribuye alrededor del lecho.
3. La configuración adoptada del humedal propuesto permite evitar las zonas muertas, pero para un desempeño adecuado del mismo, se debe realizar el ajuste a un determinado rango de caudales.
4. El fierro y manganeso son metales que en todos los casos se eliminan en forma secuencial, a lo largo de un humedal. Una vez que se elimina el fierro, comienza el proceso de remoción del manganeso, es por eso que se debe contemplar el uso de algún sustrato o reactivo adicional para permitir la remoción del manganeso residual.
5. Es recomendable contar con una zona anaeróbica en el humedal, con el objeto de remover los sulfatos presentes por acción de las bacterias sulfato reductoras, ya que al disminuir la concentración de sulfatos aumentamos el pH del medio, disminuyendo así, la solubilidad, lo que va promover la precipitación de todos los metales presentes en la muestra. Esto puede generarse aumentando la altura útil del humedal o cubriendo la superficie

posiblemente con geomallas y/o rocas de mayor tamaño para evitar la salida de gases del humedal.

6. Para la remoción del manganeso, el cual sólo precipita en condiciones alcalinas, al final del tratamiento se debería colocar aditivos o enmiendas para elevar el pH del medio, como por ejemplo carbonato de potasio o cal en cualquiera de sus presentaciones, este último es un producto conocido en el mercado, de bajo costo y efectivo.
7. Para impedir la proliferación de vectores y el contacto de aves con la muestra durante la investigación es prudente evitar la acumulación de agua en las esquinas y bordes del humedal, se sugiere rellenar con piedra o algún otro material inerte.
8. La simulación de una muestra de drenaje minero elaborada con reactivos de calidad, puede resultar provechosa para fines prácticos de investigación.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PRINCIPALES

- 1) Osvaldo Aduvire (Dr. Ing. de Minas) - DRENAJE ACIDO DE MINA GENERACIÓN Y TRATAMIENTO Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente, Madrid, 2006.
- 2) Gerald A. Moshiri - **Constructed Wetlands for Water Quality Improvement (1993)**
- 3) López Pamo, E. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21 ISSN: 0366-0176 (2002)
- 4) Joan García, Jordi Morato, Josep María Bayona: "Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Una alternativa de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales". Editorial Barcelona (2004).
- 5) Elfri Ruth Inga Blancas, "Tratamiento de Efluentes por el Método de Pantanos Artificiales (Wetland)" Tesis para optar el grado académico de maestro en ciencias. UNI - Lima, Perú (2011).
- 6) Renato Carlo Villanueva Álvarez, Fernando Rodrigo Sánchez Pinto, "Diseño de tratamiento pasivo después del plan de cierre de mina" Tesis para optar título profesional de Ingeniero Sanitario. UNI - Lima, Perú (2013).
- 7) Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas: **[www.ingenieroambiental.com/4014/compendio-drenaje.pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4014/compendio-drenaje.pdf)**.



### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARIAS**

- 1) Calle Macas, María Fernanda y Coello Montoya, Ramiro Alberto - Tesis de grado: "Uso de humedales artificiales superficiales para remoción de contaminantes industriales" Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil - Ecuador (2015).
- 2) Alayo Villanueva, Bilmar Arnulfo y Loje Rezkala, María de Fátima – Trabajo de Investigación Aplicada: "Influencia de la Concentración de  $H_2O_2$ ,  $Ca(OH)_2$  y NaOH en la Remoción de Mn del Drenaje Ácido de Mina" Universidad Nacional de Trujillo – Facultad de Ingeniería Química (2017).
- 3) Enrique Jimeno Blasco, Análisis de Aguas y Desagües 2da. Edición, Lima, Perú (1998).
- 4) Folleto informativo de tecnología de aguas residuales humedales de flujo sub superficial – US EPA septiembre 2000.

## ANEXOS

### ANEXO N° 01: PANEL FOTOGRÁFICO PROCESO CONSTRUCTIVO DEL HUMEDAL

**IMAGEN N° 01**



**IMAGEN N° 02**



**IMAGEN N° 03**



**IMAGEN N° 04**



**IMAGEN N° 05**



**IMAGEN N° 06**



**PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN: PRUEBAS PRELIMINARES**

**IMAGEN N° 07**



**IMAGEN N° 08**



**IMAGEN N° 09**



**IMAGEN N° 10**



**PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN: PRUEBAS EFECTIVAS**

**IMAGEN N° 11**



**IMAGEN N° 12**



**IMAGEN N° 13**



**IMAGEN N° 14**






**IMAGEN N° 15**



**IMAGEN N° 16**



**ANEXO N°02: CERTIFICADOS DE CALIDAD DE LOS REACTIVOS UTILIZADOS**




**Central Drug House (P) Ltd.**  
AN ISO 9001:2008 COMPANY  
Manufacturers of : Laboratory Fine Chemicals & Dehydrated Culture Media


**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

**FERROUS SULPHATE HEPTAHYDRATE AR/ACS**  
MEETS ANALYTICAL SPECIFICATION OF IP, BP, USP, PH.EUR.

|   |  |                                  |
|---|--|----------------------------------|
| PRODUCT CODE                            | 529075   | Batch No. : 140516               |
| SYNONYMS                                | [Iron (II) sulphate]   | Mfg. : May. 2016                 |
| C.I. NO.                                | --   | Best Before : Apr. 2021          |
| CASR NO.                                | (7782-63-0)  |                                  |
| ATOMIC OR MOLECULAR FORMULA             | FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O   |                                  |
| ATOMIC OR MOLECULAR WEIGHT              | 278.01   |                                  |
| PROPERTIES                              | Insoluble in alcohol, mp 64°C, Hygroscopic.  |                                  |
| <b>FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O</b> |  |                                  |
| PARAMETER                               | LIMIT  | OBSERVED                         |
| Description                             | Bluish green crystals or light green crystalline powder.   | Bluish green crystalline powder. |
| Solubility                              | 10% solution in a mixture of freshly boiled, cooled water and dilute sulphuric acid is clear and bright. | Complies                         |
| Identification                          | Passes test.   | Passes test                      |
| Minimum Assay (Redox Titration)         | 99.5%  | 99.74%                           |
| pH of (5% soln in water)                | 3 - 4  | 3.5                              |
| <b>MAXIMUM LIMIT OF IMPURITIES</b>      |  |                                  |
| Chloride (Cl)                           | 0.0005%  | Less than 0.0005%                |
| Nitrogen compound (N)                   | 0.001%   | Less than 0.001%                 |
| Arsenic (As)                            | 0.0002%  | Less than 0.0002%                |
| Copper (Cu)                             | 0.001%   | Less than 0.001%                 |



In compliance with standard specifications of CDH  
This CDA has been generated electronically and it is valid without signature.



Corp. Office : 7/26, Vardaan House, Ansari Road,  
Daryaganj, New Delhi-110002 (India)

Phone : + 91-11-49404040 (100 Lines) |  
Fax : + 91-11-49404050, 23280932

E-mail : sales@cdhfinechemical.com  
expert@cdhfinechemical.com

[cdhfinechemical.com](http://cdhfinechemical.com)

TESIS: "EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DEL HIERRO, MANGANESO Y SULFATOS CONTENIDOS EN UNA MUESTRA DE AGUAS ÁCIDAS, TRATADA MEDIANTE UN HUMEDAL DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL CON LA ESPECIE DRACAENA SANDERIANA COMO COMPONENTE VEGETATIVO"



**Central Drug House (P) Ltd.**

AN ISO 9001:2008 COMPANY

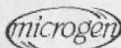
Manufacturers of : Laboratory Fine Chemicals & Dehydrated Culture Media

|  |                                 |                   |
|--|---------------------------------|-------------------|
| Ferric ion (Fe <sup>3+</sup> )         | 0.02%                           | Less than 0.02%   |
| Lead (Pb)                              | 0.0005%                         | Less than 0.0005% |
| Manganese (Mn)                         | 0.05%                           | Less than 0.05%   |
| Mercury (Hg)                           | 0.0002%                         | Less than 0.0002% |
| Zinc (Zn)                              | 0.005%                          | Less than 0.005%  |
| Organic volatile impurities            | Excluded by Production process. | Complies          |
| Nickel (Ni)                            | 0.005%                          | Less than 0.005%  |
| Phosphate (PO <sub>4</sub> )           | 0.001%                          | Less than 0.001%  |
| Calcium (Ca)                           | 0.005%                          | Less than 0.005%  |
| Chromium (Cr)                          | 0.005%                          | Less than 0.005%  |
| Potassium (K)                          | 0.002%                          | Less than 0.002%  |
| Magnesium (Mg)                         | 0.008%                          | Less than 0.008%  |
| Sodium (Na)                            | 0.02%                           | Less than 0.02%   |
| Substances not precipitated by ammonia | 0.1%                            | 0.08%             |

**Remarks :** Sample complies as per above specification.

ANALYST

MANAGER (Q.C.)



CE Certified

In compliance with standard specifications of CDH

This CDA has been generated electronically and it is valid without signature.

Corp. Office : 7/26, Vardaan House, Ansari Road,  
Daryaganj, New Delhi-110002 (India)

Phone : +91-11-49404040 (100 Lines)  
Fax : +91-11-49404050, 23280932

E-mail : sales@cdhfinechemical.com  
export@cdhfinechemical.com

cdhfinechemical.com



TESIS: "EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DEL HIERRO, MANGANESO Y SULFATOS CONTENIDOS EN UNA MUESTRA DE AGUAS ÁCIDAS, TRATADA MEDIANTE UN HUMEDAL DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL CON LA ESPECIE DRACAENA SANDERIANA COMO COMPONENTE VEGETATIVO"



**Central Drug House (P) Ltd.**

AN ISO 9001:2008 CERTIFIED COMPANY

Manufacturers of : Laboratory Fine Chemicals & Dehydrated Culture Media

www.cdhfinechemical.com

| CERTIFICATE OF ANALYSIS                |   |                         |
|--|---|-------------------------|
| MANGANESE (II) SULPHATE MONOHYDRATE AR |   |                         |
| PRODUCT CODE                           | 569075                                  | Batch No. : 060416      |
| SYNONYMS                               | Manganous sulphate                      | Mfg. : Apr. 2016        |
| C.I. NO.                               | --                                      | Best Before : Mar. 2021 |
| CASR NO.                               | (10034-96-5)                            |                         |
| ATOMIC OR MOLECULAR FORMULA            | MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O     |                         |
| ATOMIC OR MOLECULAR WEIGHT             | 169.01                                  |                         |
| PROPERTIES                             | Insoluble in alcohol.                   |                         |
| MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O    |   |                         |
| PARAMETER                              | LIMIT                                   | OBSERVED                |
| Description                            | Light pink coloured crystalline powder. | Complies                |
| Solubility                             | 10% solution in water is clear.         | Complies                |
| Identification                         | Passes test.                            | Passes test             |
| Minimum Assay (Complexometric)         | 99.0%                                   | 99.6%                   |
| pH (of 5% aq. soln.)                   | 3.5 - 5.0                               | 4.2                     |
| MAXIMUM LIMIT OF IMPURITIES            |   |                         |
| Loss on ignition (at 500°C)            | 10 - 12%                                | 10.52%                  |
| Water insoluble matter                 | 0.01%                                   | 0.008%                  |
| Chloride (Cl)                          | 0.001%                                  | Less than 0.001%        |
| Calcium (Ca)                           | 0.25%                                   | Less than 0.25%         |
| Copper (Cu)                            | 0.0005%                                 | Less than 0.0005%       |
| Arsenic (As)                           | 0.0004%                                 | Less than 0.0004%       |
| Iron (Fe)                              | 0.001%                                  | Less than 0.001%        |
| Lead (Pb)                              | 0.001%                                  | Less than 0.001%        |
| Heavy metals (as Pb)                   | 0.002%                                  | Less than 0.002%        |
| Magnesium (Mg)                         | 0.005%                                  | Less than 0.005%        |
| Nickel (Ni)                            | 0.002%                                  | Less than 0.002%        |
| Potassium (K)                          | 0.08%                                   | Less than 0.08%         |
| Sodium (Na)                            | 0.05%                                   | Less than 0.05%         |
| Zinc (Zn)                              | 0.001%                                  | Less than 0.001%        |
| Substances reducing iodine (I)         | 0.01%                                   | 0.007%                  |
| Substances reducing permanganate (O)   | 0.001%                                  | 0.0007%                 |
| Sub. Not ppted by ammonium sulphide    | 0.5%                                    | 0.3%                    |
| Organic volatile impurities            | Conforms/meets the requirement.         | Complies                |

Remarks : Sample complies as per above specification.

ANALYST

MANAGER (Q.C.)



Corp. Office : 7/28, Vardaan House, Ansari Road,  
Daryaganj, New Delhi-110002 (India)

Phone : +91 11 49404040 (100 Lines)  
Fax : +91 11 49304050, 23260932

E-mail : sales@cdhfinechemical.com  
export@cdhfinechemical.com

In compliance with standard specifications of CDH  
This CDA has been generated electronically and it is valid without signature

cdhfinechemical.com

