

UNIVERSIDAD
CIENTÍFICA
DEL SUR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE
NUTRIENTES DEL EFLUENTE DE LA PTAR DE LA EMPRESA
ESMERALDA CORP S.A.C. MEDIANTE EL USO DE
HUMEDALES ARTIFICIALES, EMPLEANDO LA ESPECIE *Typha
domingensis Pers.* (TOTORA)”**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Bach. ALICIA DEL CARMEN EDUARDO PAREJA

LIMA, PERÚ

2015

A Dios por permitirme desarrollar esta investigación a plenitud.

A mi mamá Rebeca, papá Antonio, mis hermanos Andrea y Renato y mi mamá Sofía, por su apoyo incondicional y sus sabios consejos cuando más lo necesitaba, que me dieron las fuerzas para seguir adelante y concluir con esta investigación.

A mi angelito en el cielo, mi papá Batito, que fue mi motivación día a día para cumplir con esta meta. Asimismo, quisiera dedicar mi investigación a muchas personas más, pero faltarían hojas en el mundo para poder expresar todo lo que han hecho por mí y todo el amor que siento por ellas (lo cual podría impactar a la diversidad de árboles), a ellas se los dedico también.

A mi facultad de Ingeniería y Gestión Ambiental de la Universidad Científica del Sur (UCSUR) por la formación recibida durante los cinco años de carrera, y a mis magníficos profesores por las grandiosas clases dictadas.

A Esmeralda Corp SAC, en especial a Maria Luisa, Lidia, Honorato, Carlos y Henry por su financiamiento y cooperación en el desarrollo de mi investigación.

A mi asesora, Ing. Betty Peña, por su apoyo, confianza y colaboración durante el desarrollo de mi investigación.

I.	RESUMEN	6
II.	ABSTRACT	8
III.	INTRODUCCIÓN	10
IV.	REVISIÓN DE LITERATURA Y MARCO TEÓRICO	12
	4.1. MARCO CONCEPTUAL.....	12
	4.1.1. Agua residual	12
	4.1.2. Humedal Artificial.....	12
	4.1.3. Componentes de los Humedales Artificiales.....	14
	4.1.4. Tipos de humedales artificiales.....	19
	4.1.5. Mecanismos de remoción de nutrientes en HAFSS.....	24
	4.1.6. <i>Typha domingensis</i> Pers. (totora).....	28
	4.2. MARCO ESPACIAL	37
	4.3. MARCO TEMPORAL	41
	4.4. MARCO HISTÓRICO	41
	Trabajos de investigación previos.....	42
	4.5. MARCO LEGAL	52
V.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
	5.1. MATERIALES Y EQUIPOS	56
	5.2. MÉTODO	57
	5.2.1. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	57
	5.2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	57
	5.2.3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES	58
	a. Caracterización inicial del agua residual.....	58
	b. Diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS)	60
	c. Construcción del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS).....	65
	d. Funcionamiento del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS)	69
	e. Monitoreo del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS)	70
VI.	RESULTADOS.....	71
	6.1. PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS	71
	6.1.1. pH	71
	6.1.2. TURBIEDAD.....	72
	6.1.3. TEMPERATURA	73
	6.2. PARÁMETROS PRINCIPALES.....	74
	6.2.1. NITRÓGENO TOTAL (N).....	74

6.2.2.	NITRÓGENO AMONIACAL ($N-NH_4^+$)	
6.2.3.	NITRATOS ($N-NO_3^-$)	80
6.2.4.	FÓSFORO TOTAL (Pt).....	83
6.2.5.	ORTOFOSFATOS (PO_4^{3-})	85
6.2.6.	ANHÍDRIDO FOSFÓRICO (P_2O_5)	87
6.3.	EVOLUCIÓN DE LA TOTORA EN FUNCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL HAFFS	89
VII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	91
7.1.	PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS	91
7.1.1.	pH	91
7.1.2.	TURBIEDAD.....	92
7.2.	PARÁMETROS PRINCIPALES.....	94
7.2.1.	NITRÓGENO TOTAL (Nt)	94
7.2.2.	NITRÓGENO AMONIACAL ($N-NH_4^+$)	96
7.2.3.	NITRATOS ($N-NO_3^-$).....	99
7.2.4.	FÓSFORO TOTAL (Pt).....	101
7.2.5.	ORTOFOSFATOS (PO_4^{3-})	103
7.2.6.	ANHÍDRIDO FOSFÓRICO (P_2O_5)	104
7.3.	EVOLUCIÓN DE LA TOTORA EN FUNCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL HAFFS	106
VIII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
X.	GLOSARIO.....	115
a.	Aerénquima.....	115
b.	Afluente.....	115
c.	Alcalinidad.....	115
d.	Androceo.....	115
e.	Bacterias aerobias.....	115
f.	Brácteolas	115
g.	Bacterias anaerobias.....	115
h.	Carga hidráulica	115
i.	Coliformes fecales	115
j.	Demanda química ambiental (DQO).....	115
k.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	116
l.	Efluente	116
m.	Estigmas	116

n.	Eutrofización	116
o.	Ginóforo	116
p.	Glumilla	116
q.	Inflorescencia	116
r.	Macrófita	116
s.	Metahemoglobinemia	117
t.	Nitrato (NO_3^-)	117
u.	Nitrito (NO_2^-)	117
v.	Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3/ \text{NH}_4^+$)	117
w.	Nitrógeno orgánico	117
x.	Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK)	117
y.	Nutrientes	118
z.	Ortofosfatos	118
aa.	Perigonio	118
bb.	Sépalo	118
cc.	Sistemas de pre-tratamiento	118
dd.	Sistemas de tratamiento primario	118
ee.	Sólidos suspendidos totales (SST)	118
ff.	Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	118
gg.	Tiempo de retención hidráulico (TRH)	118
hh.	Umbela	119
ii.	Verticilo	119
XI.	ANEXOS	120

Cuadro IV-1	Procesos naturales en un Humedal Artificial	13
Cuadro IV-2	Características medias del sustrato en Humedales de Flujo Subsuperficial de Flujo Horizontal (HASSFH)	16
Cuadro IV-3	Propiedades de las plantas en los Humedales Artificiales.....	18
Cuadro IV-4	Oxígeno disponible por vegetación emergente de un humedal	19
Cuadro IV-5	Ecuación 1: Cálculo de NTO para el subsistema FV (formulada por Cooper, 1999).....	48
Cuadro IV-6	Ecuación 2: Cálculo de ATS del subsistema FV.....	49
Cuadro IV-7	Ecuación 3: Cálculo de N° de subsistemas FV requeridos.....	49
Cuadro IV-8	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua de la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (lagunas y lagos) .	53
Cuadro IV-9	Valores guía de la OMS para el reuso de aguas residuales en la acuicultura	54
Cuadro V-1	Listado de materiales y equipos utilizados	56
Cuadro V-2	Resultados de los parámetros evaluados en la caracterización del agua residual y métodos asociados	59
Cuadro V-3	Tipos de recipientes y preservantes relacionados a cada tipo de análisis.....	60
Cuadro V-4	Parámetros de diseño del HAFSS.....	65
Cuadro VI-1	Cuadro comparativo de las características de la planta y la remoción de nutrientes	89

Lista de Figuras

Figura IV-1	Estructuras vegetativas de la especie <i>Typha spp.</i>	17
Figura IV-2	Humedal Artificial de Flujo Superficial (HAFS)	20
Figura IV-3	Sección transversal de un HAFSSH.....	22
Figura IV-4	Esquema en corte de un HASSFV	23
Figura IV-5	Esquema de la sección transversal de un HASSFV	24
Figura IV-6	Características morfológicas de la <i>Typha domingensis</i> Pers.....	30
Figura IV-7	Estructuras vegetativas de la totora (<i>Typha domingensis</i> Pers.)	34
Figura IV-8	Mecanismos de remoción de nutrientes de la totora	36
Figura IV-9	Imagen satelital de la ubicación y vista de la empresa Esmeralda Corp S.A.C. (Chorrillos)	39
Figura IV-10	Ubicación y vista de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la empresa Esmeralda Corp S.A.C.....	40
Figura V-1	Vista de perfil del HAFSS.....	68
Figura V-2	Vista de planta del HAFSS.....	68

La presente investigación consiste en la implementación de un Humedal Artificial o Wetland de Flujo Subsuperficial (HAFSS) en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Esmeralda Corp S.A.C., empleando como vegetación emergente a la especie *Typha domingensis* Pers.(totora); con la finalidad de reducir los niveles de nutrientes – nitrógeno y fósforo– del efluente de la PTAR, mejorando así su calidad y minimizando los potenciales impactos ambientales negativos que se pudieran originar por el reuso de dicho efluente.

El HAFSS presentó las siguientes dimensiones: 3 m de largo, 1 m de ancho, 0.8 de profundidad efectiva y pendiente de 1%. Conformado por dos (02) sustratos, el primer sustrato fue de arena gruesa y el segundo de confitillo 3/8", ambos de 0.3 m de profundidad; y por último, en la parte superior se sembró plantones de totora.

El agua residual a ser tratada (afluente) en el HAFSS fue captada del tanque final donde se almacena el efluente de la PTAR, a través de un sistema de distribución conformado por una manguera y un tanque de almacenamiento. El caudal de tratamiento fue de 170 L/d con un tiempo de retención hidráulica de seis (06) días.

El funcionamiento del HAFSS se realizó en dos etapas: (i) período de arranque, durante tres (03) meses (diciembre del 2013 a febrero del 2014) con el objetivo de lograr la adaptación de las totoras y (ii) período de funcionamiento estándar, durante seis (06) meses (marzo hasta agosto del 2014), donde se inició el tratamiento a través del HAFSS. En el período de arranque se evaluaron parámetros físicos como pH, turbiedad y temperatura, en cambio, en el período de funcionamiento estándar se evaluaron parámetros principales y complementarios, tanto en el afluente como en el efluente.

Entre los parámetros principales se encuentran: nitrógeno total (N-total), nitrógeno amoniacal (N-amoniacal), nitratos (N-nitratos), fósforo total (P-total), ortofosfatos y anhídrido fosfórico, mientras que los parámetros complementarios fueron: pH, turbiedad y temperatura. Se reportó una remoción final de 87.8% de N-total, 90% de N-amoniacal y 99.6% de N-nitrato; con relación al fósforo, se registró 94.5% de P-total, 99.4% de ortofosfatos y 94.3% de anhídrido fosfórico de remoción final. Estos valores reflejan una alta eficiencia del HAFSS en la remoción de nutrientes como el nitrógeno y fósforo.

Asimismo, se evaluó la viabilidad del reuso del efluente del HAFSS en la acuicultura comparando los valores registrados en dicho efluente con los estándares nacionales (Categoría 4 del ECA-Agua) y con estándares internacionales (valores guía de la EPA de los estados de Florida, Carolina del Norte y Washington para reuso en ambientes naturales), concluyéndose que se requiere un tratamiento adicional para poder reusarlo en la acuicultura.

Finalmente, debido a la alta eficiencia, bajos costos, facilidad de operación y mantenimiento, y la semejanza de la calidad del afluente con un agua residual doméstica, el HAFSS podría ser utilizado en zonas rurales que carezcan de redes de alcantarillado público.

Palabras clave: humedal artificial de flujo subsuperficial, *Typha domingensis* Pers., totora, afluente, efluente, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo total, ortofosfatos, anhídrido fosfórico, acuicultura.

The present investigation involves the implementation of Constructed Wetland of Subsurface Flow (CWSF) in the Wastewater Treatment Plant (WTP) of Esmeralda Corp S.A.C., using *Typha domingensis* Pers. (bulrushes) as emergent vegetation specie, in order to reduce levels of nutrients –nitrogen and phosphorus– in the effluent of the WTP, improving their quality and minimizing potential negative environmental impacts, that may be result of the reuse of the effluent.

The CWSF had the following dimensions: 3 m long, 1 m wide, 0.8 effective depth and slope of 1%. Consisting of two (02) substrates, the first was coarse sand and the second was confitillo 3/8", both have 0.3 m of depth; finally, at the top was planted seedlings of bulrushes.

The wastewater to be treated in the CWSF (influent) was captured from the final tank, where the effluent of the WTP is stored, through a distribution system consisting in hoses and a storage tank. The treatment flow was 170 L/d with a hydraulic retention time of six (06) days.

The operation of CWSF was carried out in two (02) stages: period of start-up, during three (03) months (December of 2013 to February 2014) with the aim of achieving the adaptation of bulrushes in the CWSF, and (ii) period of standard use, during six (06) months (March to August 2014) where treatment was initiated by CWSF. In the period of start-up, some physical parameters were evaluated, such as: pH, turbidity, and temperature; on the other hand, in the period of standard use were evaluated main and complementary parameters, in the influent as the effluent.

The main parameters are: total nitrogen (N-total), ammoniacal nitrogen (N-ammonia), nitrates (N-nitrate), total phosphorus (P-total), orthophosphate and phosphorus pentoxide, while the complementary parameters were: pH, turbidity and temperature. It was reported a final removal of 87.8% of N-total, 90% of N-ammonia and 99.6% of N-nitrate; in relation of phosphorus, 94.5% of P-total, 99.4% of orthophosphate and 94.3% of phosphorus pentoxide was recorded. These values indicate a high efficiency of CWSF on removal of nutrients such as nitrogen and phosphorus.

Also, the feasibility of reuse of the effluent of the CWSF in aquaculture was evaluated, comparing the values recorded in this effluent with the national standards (ECA, category 4) and international standards (EPA guidelines of Florida, North Carolina and Washington for environmental reuse), concluding that is required an additional treatment in order to reuse it in aquaculture.

Finally, due to the high efficiency, low cost, ease of operation and maintenance, and the similarity of influent quality with the domestic



wastewater, the CWSF could be used in rural areas where public sewerage networks could be lacked.

Keywords: constructed wetland of subsurface flow, *Typha domingensis* Pers., bulrushes, influent, effluent, total nitrogen, ammoniacal nitrogen, nitrates, total phosphorus, orthophosphate, phosphorus pentoxide, aquaculture.

La descarga de las aguas residuales a cuerpos de agua como los ríos o mares ha sido una práctica común desarrollada a lo largo del tiempo por las diferentes poblaciones. El vertido indiscriminado de las aguas residuales sin tratamiento – proveniente de diferentes actividades socioeconómicas– se ha ido incrementando con el pasar de los años y con el crecimiento poblacional acentuando el impacto ambiental generado en los cuerpos de agua, de manera que, el nivel de resiliencia de estos cuerpos ha ido disminuyendo gradualmente. Esto obligó a que se desarrollaran alternativas de tratamiento de aguas residuales que sean ambiental, social y económicamente viables.

Entre las soluciones más atractivas, se encuentran los tratamientos que simulan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza. Estos sistemas se denominan Tratamientos Naturales de Aguas Residuales, entre ellos tenemos: el Uso de Lagunajes, de Sistemas de Infiltración, de Humedales Artificiales, etc.

Actualmente, el sistema de tratamiento de Humedales Artificiales es cada vez más aceptado a nivel mundial y ha sido utilizado con más frecuencia en muchos países desarrollados (ej. Alemania, Inglaterra, Francia, Dinamarca, Polonia, Italia, entre otros). Esto se debe al bajo costo de operación y mantenimiento, al mismo tiempo, que producen efluentes tratados de buena calidad (Arias & Brix, 2003; Gaboutloeloe et al., 2008).

El uso de Humedales Artificiales para tratar aguas residuales industriales y domésticas se ha incrementado en los últimos veinte años, siendo una opción reconocida y recomendada para el tratamiento de aguas residuales. Cabe resaltar que este sistema se utiliza como tratamiento secundario, ya que, requiere de un afluente pre-tratado.

Entre sus beneficios encontramos: mejorar la calidad ambiental, es decir, reducen la materia orgánica, transforman y asimilan nutrientes, y retienen y/o eliminan sustancias tóxicas presentes en el agua residual. Crean y restauran nichos ecológicos, contribuyen a mejorar el paisaje y en la generación de zonas de amortiguamiento de crecidas de río y avenidas. Además, son fuente de agua en procesos de reutilización de aguas residuales para riego y crianza de peces, y aportan ventajas en otras actividades de carácter turístico y económico.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la empresa Esmeralda Corp SAC, ubicada en el distrito de Chorrillos en la zona de amortiguamiento del Refugio de Vida Silvestre “Pantanos de Villa” (RVSPV), viene funcionando desde los primeros meses del año 2011. Se encarga de tratar efluentes industriales provenientes, principalmente, de las industrias alimentarias establecidas dentro de sus instalaciones.

Esta planta cuenta con diferentes unidades de tratamiento para garantizar una calidad adecuada del efluente final. Sin embargo, los niveles de nutrientes como el nitrógeno y fósforo se encuentran en concentraciones mayores a las establecidas según normativa nacional. Pudiendo ocasionar impactos significativos en el ambiente como la contaminación del agua subterránea y eutrofización de los espejos de agua encontrados en sus instalaciones, así como, efectos negativos sobre la salud de la población cercana.

En ese sentido, el presente proyecto consiste en la implementación de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS) en la PTAR de Esmeralda Corp SAC, empleando como vegetación emergente a la especie *Typha domingensis* Pers. (totora); con la finalidad de reducir los niveles nitrógeno y fósforo del efluente de la PTAR. Específicamente, en el HAFSS se pretende evaluar: (i) el % de remoción del nitrógeno en términos de nitrógeno total (Nt), nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) y nitratos (N-NO_3^-), (ii) el % de remoción de fósforo en términos de fósforo total (Pt), fosfatos (PO_4^{-3}) y anhídrido fosfórico (P_2O_5) y (iii) la viabilidad del reuso del efluente tratado por el HAFSS en la acuicultura según lo establecido en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para conservación del ambiente acuático (Categoría 4), como también en las Directrices Sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura de la Organización Mundial de la Salud (OMS) u otra norma internacional afín.

De esa manera, se planteó como hipótesis general que el tratamiento mediante HAFSS es una tecnología efectiva para la reducción de los niveles de nutrientes del efluente de la PTAR, en términos de nitrógeno y fósforo total. Además, específicamente se planteó que (i) el uso de la totora en el HAFSS ayuda a la remoción de nutrientes, (ii) el tratamiento de aguas residuales mediante el HAFSS es eficiente para la remoción de nitrógeno amoniacal, nitratos y fosfatos, y (iii) el efluente tratado por el HASS cumple con los parámetros de los ECA para agua en función a su reuso para la conservación del ambiente acuático y con las directrices sanitarias es viable según la normativa nacional e internacional para su reuso en la acuicultura.

4.1. MARCO CONCEPTUAL

4.1.1. Agua residual

Aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, que tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o ser reusadas y que por sus características requieran un tratamiento previo (ANA, 2013).

De acuerdo a su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como:

- *Aguas residuales domésticas:* Procedentes de residencias como las que provienen de baños, lavandería, cocinas, entre otros.
- *Aguas residuales comerciales:* Proviene de establecimientos comerciales, públicos y similares.
- *Aguas residuales industriales:* Proviene de vertidos industriales, poseen características específicas dependiendo de la industria de origen.
- *Infiltraciones y aportaciones incontroladas:* Las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado, a través de empalmes de tuberías, paredes de tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza, etc. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que se descargan en la red por medio de pozos de registro, bajantes de edificios, entre otros.

4.1.2. Humedal Artificial

Sistema de fitodepuración de aguas residuales de profundidad variable (0.5 – 1.7cm) construido por el hombre. Consiste en la construcción de un humedal o pantano donde se desarrolla un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de sustrato (grava, arena o piedra) impermeabilizado, que se encuentra alimentado por el agua residual a tratar (Osnaya, 2012).

Los procesos llevados a cabo en el humedal (ver Cuadro IV-1) por la acción conjunta de las macrófitas, el sustrato y los microorganismos propios del agua residual remueven los contaminantes presentes en ella, como los sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nutrientes, metales y patógenos. Así, su funcionamiento se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de los microorganismos, el aporte de oxígeno a las especies vegetales durante el día y el apoyo físico del lecho inerte como soporte para el enraizamiento de las especies vegetales, además de servir como un medio filtrante (Delgadillo, Camacho, Perez & Andrade; 2010).

Según Lara (1999), los humedales artificiales tienen tres principales funciones:

- ✓ Fijar físicamente los contaminantes insolubles en la superficie del sustrato.
- ✓ Utilizar y transformar los elementos contaminantes por medio de los microorganismos y de la biomasa vegetal.
- ✓ Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y de mantenimiento.

Cuadro IV-1 Procesos naturales en un Humedal Artificial

FASE	PROCESO
Acción bacteriana	Conversión y transformación de contaminantes. En la transformación aerobia de los residuos orgánicos se consume oxígeno. También se realizan transformaciones de productos orgánicos tóxicos. Siempre se reduce DBO.
Absorción de oxígeno	Si la lámina líquida del humedal no está en saturación de oxígeno disuelto, lo toma de la atmósfera, en una aireación natural.
Desorción de oxígeno	Es la situación contraria a la absorción de oxígeno.
Sedimentación	Se debe al movimiento lento del afluente, que hace que los sólidos en suspensión se depositen en el fondo. En ciertos casos se produce una floculación. En otros se producen turbulencias (en la entrada) que hacen que estos sólidos se distribuyan uniformemente por todo el humedal.
Degradación natural	La supervivencia de muchos organismos tiene un plazo limitado, por lo que, gran parte de ellos muere pasado un período de tiempo en el humedal. Por otra parte, la acción fotoquímica provoca la oxidación de muchos componentes orgánicos.
Adsorción	Muchos contaminantes químicos tienden a unirse por adsorción con diversos sólidos, lo que dependerá, en gran parte, de la cantidad y composición de estos presentes en suspensión en el agua residual.
Volatilización	Los contaminantes volátiles presentes en el líquido se transfieren a la atmósfera.
Reacciones	Aparte de las reacciones fotoquímicas que ya se han indicado en la degradación natural, en el humedal existen fenómenos de hidrólisis, oxidaciones diversas, reducciones, etc.
Evaporación	Aparte de la volatilización y la desorción de oxígeno, muchos gases que se pueden aportar con el afluente se pueden evaporar, y lo mismo ocurre con parte de la masa del humedal, que puede ver reducido así su volumen.

Fuente: Seoáñez (2004)

Los humedales artificiales están conformados por tres componentes:

a. Sustrato

El sustrato puede estar conformado por arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumula en el humedal. Su característica principal es tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso de agua a través de él. Lo que obliga a utilizar materiales de tipo granular, principalmente la grava con un diámetro de aproximadamente 5 mm y poros finos (Delgadillo et al., 2010). Entre sus funciones más importantes se presentan:

- ✓ Actúan como barrera primaria de filtración.
- ✓ Sirve como soporte para el crecimiento de la vegetación y colonias microorganismos (biopelícula) que biodegradan la materia orgánica.
- ✓ Ayuda a eliminar ciertas sustancias mediante interacciones físicas y químicas.
- ✓ Influye en el movimiento del afluente a través del humedal por su permeabilidad.

Según Miglio (2003), las propiedades del sustrato son:

- ✓ **Hidráulicas:** La estructura del sustrato define las propiedades hidráulicas del humedal. Así, Arias (2004) indica que el tamaño del sustrato afecta directamente al flujo hidráulico del humedal, y por consiguiente, al caudal del afluente a tratar. Menciona por ejemplo, si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y filtración, ya que el diámetro de los poros son pequeños; sin embargo, presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando así el caudal a tratar. Lo contrario sucedería si el sustrato estaría compuesto por grava y arena fina.

Los problemas que se encuentran con mayor frecuencia en el comportamiento hidráulico son los cortocircuitos y la colmatación. Los cortocircuitos ocurren cuando una gran cantidad de afluente pasa a través de un canal que se abrió en la pared del sustrato. Y la colmatación se produce cuando el afluente ingresa con una alta cantidad de sólidos suspendidos.

- ✓ **Químicas:** Las partículas del sustrato tienden a adsorber parte de los microorganismos transportados con el agua residual. Además, al estar los poros del sustrato saturado de agua, puede formar un sustrato anóxico, que ayudará a la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.
- ✓ **Área superficial:** El área superficial del sustrato está directamente relacionada con la colonización de microorganismos, ya que, mientras mayor sea el área superficial habrá una mayor probabilidad de

adsorción de microorganismos al sustrato, y por ende mayor biodegradación de los contaminantes. De esta manera, la velocidad de remoción de contaminantes es mayor en un sistema de flujo subsuperficial debido a que tiene una mayor área superficial sumergida, y por lo tanto presentará un potencial mayor para el crecimiento de microorganismos adheridos. Según Reed et al., citado por Miglio (2003), un metro cúbico de un lecho de humedal formado por grava de 25 mm presenta un área superficial de al menos 146 m², además de la superficie que proporcionan las raíces; mientras que, en un sistema de flujo libre con igual volumen, el área superficial utilizable está entre 15 y 50 m².

A continuación, en el Cuadro IV-2 se muestra las características medias de un sustrato para HASSFH.

TIPO DE SUSTRATO	DIÁMETRO EFECTIVO D10 (mm)	POROSIDAD n (%)	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA k_s (m ³ /m ² .día)
Arena gruesa o graduada	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10000
Grava media	32	36-40	10000-50000
Piedra gruesa	128	38-45	50000-250000

Fuente: García & Bayona, tomado de Miglio (2003).

b. Microorganismos

En los humedales se desarrollan una gran variedad de microorganismos como bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. Siendo las bacterias, el grupo fundamental en el proceso depurador de las aguas residuales, es decir, de realizar el tratamiento biológico.

Según Lara (1999), la actividad biológica:

- ✓ Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- ✓ Altera las condiciones de potencial redox del sustrato, afectando así la capacidad de proceso del humedal.
- ✓ Está involucrada en el reciclaje de nutrientes, como por ejemplo las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera.

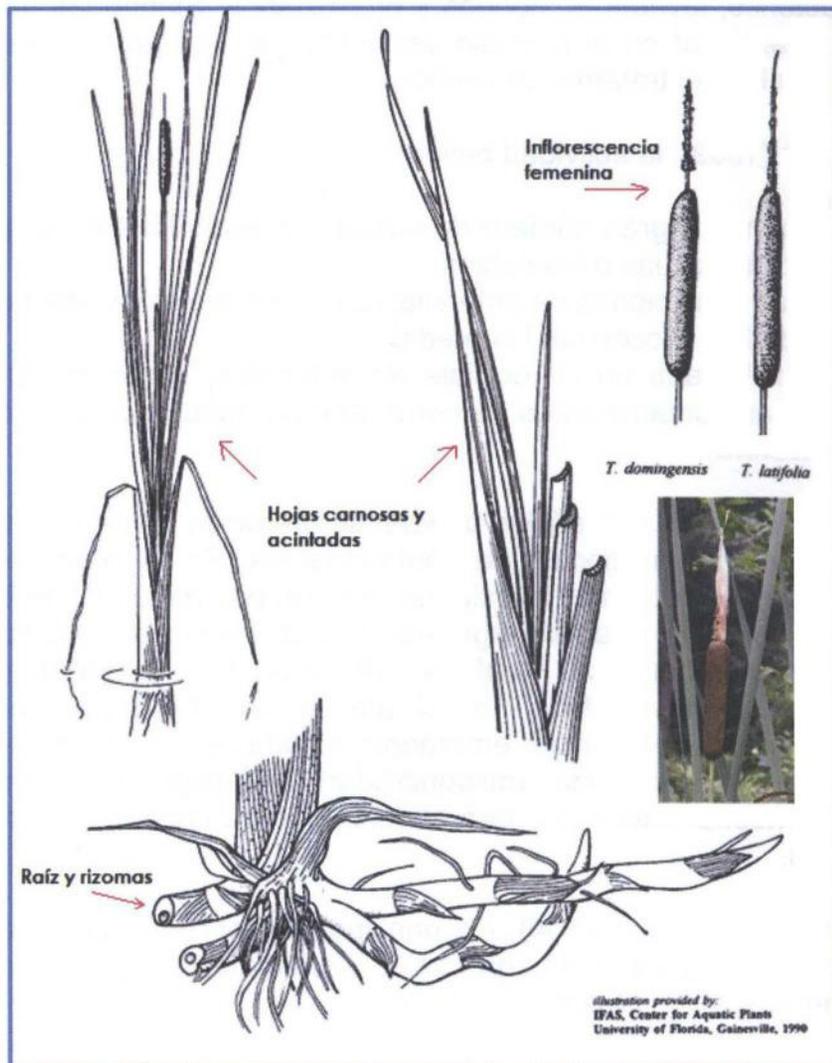
Las bacterias en los humedales pueden ser aerobias y anaerobias que son esenciales para la remoción de contaminantes. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y por la fase de intercambio agua-atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Es así que, el sustrato utilizado en el lecho del humedal, la vegetación emergente usada en el tratamiento y las condiciones del ambiente (disponibilidad de oxígeno y temperatura) proveen el hábitat adecuado para el desarrollo de las bacterias aerobias o anaerobias.

Como menciona Arias (2004), los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, eliminación de nutrientes y elementos traza, y la desinfección.

El tipo de vegetación más usado en los humedales artificiales son las macrófitas. Utilizándose con más frecuencia las plantas enraizadas o arraigadas al sustrato que presentan una parte sumergida y otra aérea emergente. Entre ellas tenemos a: la espadaña o enea (*Typha spp.*), la caña o carrizo (*Phragmites spp.*), y los juncos (*Scirpus spp.*) (EPA, 1999; EPA, 2000a).

Las plantas presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados. Como menciona García & Corzo (2008), sus tejidos internos disponen de vacíos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas y sus rizomas tienen una gran capacidad colonizadora. Es por eso, que están directamente relacionadas con la disminución de contaminantes a través de sus diferentes estructuras vegetativas (ver Figura IV-1).

Figura IV-1 Estructuras vegetativas de la especie *Typha spp.*



Fuente: Adaptado de Universidad de Florida (1990)

Cuadro IV-3 Propiedades de las plantas en los Humedales Artificiales

PARTES DE LAS PLANTAS	PROPIEDADES DE LAS PLANTAS
Tejido aéreo de las plantas	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Atenuación de la luz</u>: Proveen sombra que reduce el crecimiento de algas. • <u>Influencia en el microclima</u>: Acondicionan la temperatura en el humedal lo que es importante en climas fríos y alturas elevadas. • <u>Reducción de la velocidad del viento</u>: Evita resuspensiones • <u>Apariencia estética del sistema</u> • <u>Almacenamiento de nutrientes y metales pesados presentes en el agua residual</u>: Dependerá del tipo de planta y con su cosecha se remueve entre 5 a 10%.
Tejido de las plantas en el agua	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Efecto de filtración</u>: Retiene sólidos que se encuentran en suspensión en el agua residual. • <u>Reducción de la velocidad del agua</u>: Aumenta la sedimentación. • <u>Provee área superficial para el crecimiento bacteriano</u>. • <u>Producción de oxígeno</u>: Gracias al aporte continuo de oxígeno que proviene de tallos y hojas (sistema vascular), se incrementa la degradación aeróbica. • <u>Toma de nutrientes</u>: para incorporarlo a su tejido.
Raíces y rizomas en el sustrato	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Estabilización de la superficie del sedimento</u>: Ocasiona que la erosión sea menor. • <u>Prevención de obstrucciones en el sistema</u>: La alta densidad de raíces mejora las propiedades hidráulicas y ayuda a prevenir la colmatación. • <u>Liberación de oxígeno</u>: A través de la rizósfera se libera el oxígeno captado por el sistema vascular, necesario para la degradación microbiana y la nitrificación. • <u>Toma de nutrientes</u>: para incorporarlo a su tejido. • <u>Desarrollo de microorganismos</u>: La rizósfera de las plantas permite el desarrollo de bacterias, protozoos y hongos que habitan en el espacio que circunda las raíces.

Fuente: Adaptado de Londoño & Marín (2009)

En el caso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS), la principal función de la planta es brindar oxígeno a través de su rizósfera, lo que va a depender de la profundidad de sus raíces (ver Cuadro IV-4). El oxígeno disponible es esencial para que los microorganismos degraden la materia orgánica presente y realicen procesos de nitrificación para remover el nitrógeno amoniacal presente.

TIPO DE PLANTA	PENETRACIÓN DE RAÍCES (cm)	OXÍGENO DISPONIBLE	
		(g/m ³ xd) ^(a)	(g/m ² xd) ^(b)
Scirpus	76	7.5	5.7
Phragmites	60	8.0	4.8
Typha	50	7.0	2.1

(a) Oxígeno disponible por unidad de volumen contado en la zona de raíces.

(b) Oxígeno disponible por unidad de área superficial de lecho de 0.76 m de profundidad.

Fuente: Lara (1999)

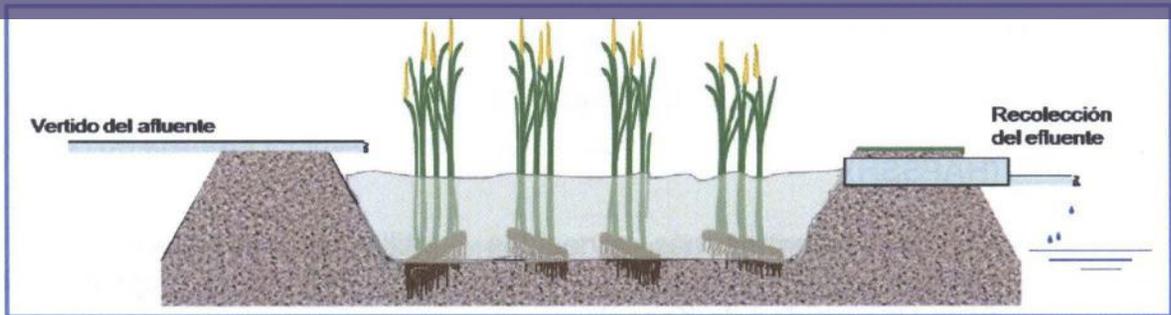
4.1.4. Tipos de humedales artificiales

Existen dos tipos de humedales artificiales:

a. Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)

Son sistemas de tratamiento secundario o avanzado en los cuales el agua residual se encuentra en contacto con la atmósfera y constituye la fuente principal de oxígeno para la aireación, por lo que, predominan las zonas aeróbicas que favorecen los mecanismos de remoción de contaminantes (Villaroel, 2005). Consisten en lagunas o canales de profundidad variable (0.40 – 1.58 m), con alguna clase de barrera subterránea que impermeabilizará la base para evitar la infiltración del agua residual, presencia de un sustrato que sirva de soporte para la vegetación emergente (flotante o parcialmente sumergida) y un afluente (agua residual pretratada) con una profundidad relativamente baja (0.1 – 0.6 m) que atraviesa la unidad (Llagas & Guadalupe, 2006; Miglio, 2003). Este afluente es alimentado mediante un flujo horizontal continuo y el tratamiento se produce mediante su circulación a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente (Lara, 1999). Según Osnaya (2012), la vegetación común para este tipo de humedales incluye carrizos, juncos, totora, juncias, jacinto de agua y lenteja de agua.

Esta clase de sistemas se pueden diseñar con el objetivo de creación de nuevos hábitats para la fauna y flora, o para mejorar las condiciones de terrenos pantanosos naturales. Se reportan porcentajes de remoción relativamente alto para diferentes contaminantes. De esta manera, Rodríguez, citado por Osnaya (2012), reporta valores de remoción como: 96% para sólidos suspendidos totales (SST), 96% para demanda bioquímica de oxígeno (DBO), 87% para demanda química de oxígeno (DQO), 40% para nitrógeno total (N-total) y 30% para fósforo total (P-total).



Fuente: García & Corzo (2008)

b. Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)

Estos sistemas se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado para aguas residuales. Es importante que en este tipo de sistemas se lleve a cabo un tratamiento previo de las aguas residuales para remover sólidos gruesos que pueda contener, con el objetivo de evitar problemas de obstrucción en el sustrato y la consecuente afectación que esto pueda tener sobre el funcionamiento de sistema (Osnaya, 2012).

Estos humedales consisten en canales, lagunas o zanjas excavadas impermeabilizadas en la base - para evitar infiltraciones - y rellenas con un sustrato de material granular poroso (generalmente grava) sobre el cual se siembran especies vegetales (Estrada, 2010; Lara, 1999).

Como refiere Sánchez (2011), el sustrato es el principal elemento, ya que, en este medio ocurren procesos como la sedimentación del material en suspensión, degradación de la materia orgánica, transformación y asimilación de nutrientes, además de la neutralización de patógenos.

El humedal se alimenta con un agua residual pre-tratada que ingresa mediante un flujo subsuperficial, es decir, por debajo de la superficie del sustrato y se mantiene así durante todo el tratamiento. Según Miglio (2003), la profundidad del flujo de agua oscila entre 0.40 a 0.70 m.

Al atravesar el sustrato, el afluente (agua residual pre-tratada) forma una película microbiana o biopelícula adherida a la superficie de este y se pone en contacto con las raíces de las plantas. Gracias a la actividad de los microorganismos -que se encuentran en la película microbiana- y a las condiciones aeróbicas brindadas por las raíces de las plantas se pueden remover ciertos contaminantes como patógenos y materia orgánica.

En estos sistemas, al no presentar flujo de agua en la superficie se evitan los problemas de mosquitos que se pueden presentar con los HAFS, tampoco existen inconvenientes con el acceso público, ni problemas en climas fríos, ya que, la capa de sustrato le presta una mayor protección térmica (Lara, 1999).

Según Sánchez (2011), los HAFSS se pueden clasificar, de acuerdo a la dirección de su flujo, en dos tipos:

b.1. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH)

Son los sistemas más conocidos y utilizados. Se desarrollaron por primera vez en Alemania, en la década del 60', por el profesor Kickuth de la Universidad de Kassel.

Consisten en zanjas excavadas o canales que se diseñan con el objetivo de proporcionar tratamiento secundario y terciario a las aguas residuales. Estas zanjas se construyen con una ligera pendiente entre la entrada y la salida (0.5 – 1%) para que se garantice un flujo de agua constante y tienen una profundidad que varía entre 0.45 a 1 m (Delgadillo et al., 2010). Son impermeabilizadas, luego rellenas con un material granular poroso, denominado sustrato, que sirve de soporte para la vegetación emergente, y a través del cual circula el agua residual pre-tratada (afluente), manteniendo su nivel por debajo de la superficie del sustrato. Tal como refiere García & Corzo (2008), el afluente se encuentra entre 0.05 a 0.1 m por debajo de la superficie del sustrato, esto se logra regulando el nivel de la tubería de salida del efluente tratado.

El afluente ingresa en forma permanente por la parte superior del lado lateral del humedal y el efluente tratado es recogido por un tubo de drenaje, ubicado en la parte opuesta inferior (ver Figura IV-3). Es importante considerar que el afluente no ingresa directamente al sustrato principal (cuerpo del humedal), sino que lo realiza a través de una zona de amortiguamiento, compuesta generalmente por grava de mayor tamaño, por la cual el flujo se distribuye uniformemente por todo el lecho. De igual forma, el tubo de drenaje es rodeado por grava del mismo tamaño que la utilizada al inicio, según Delgadillo et al. (2010) su diámetro varía entre 50 a 100 mm.

Se mantiene un flujo horizontal constante del afluente, que es tratado a medida que atraviesa el sustrato poroso, las raíces y rizomas de las plantas por procesos de filtración y absorción por acción de las plantas; filtración, sedimentación y adsorción en el sustrato, y por último, degradación microbiológica.

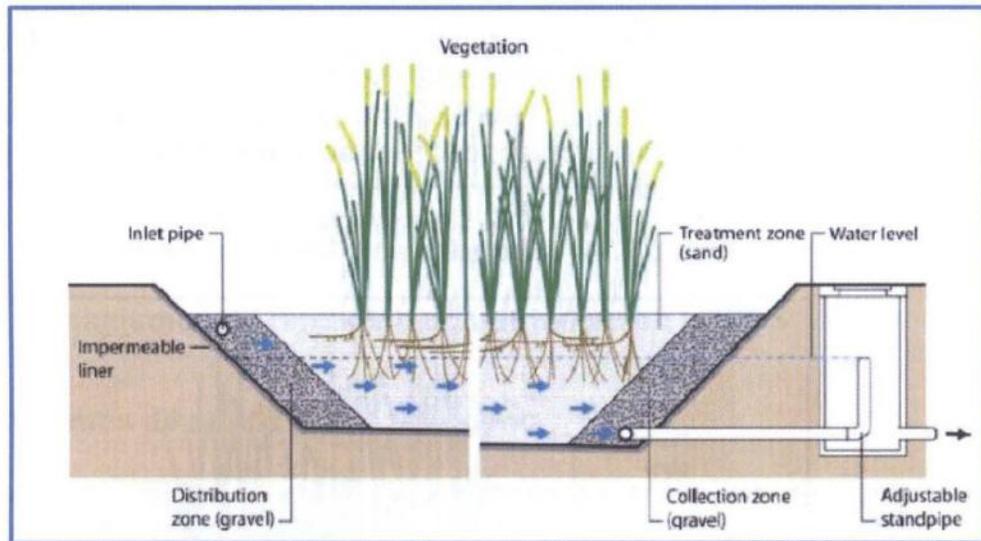
Como estos HAFSSH siempre se mantienen inundados, se debe realizar seguimiento constante, ya que, se pueden producir efluentes con malos olores, lo que indica que algunos procesos bioquímicos no se llevaron a cabo por la ausencia de oxígeno, por lo que, se produce un efluente de mala calidad.

Morel y Diener, citados por Hoffman, Platzer, Winker & Von Muench (2011), reportan eficiencias de remoción: 80-90% para DBO, 80-95%

para SST y 15-40% para N-total. Además, menciona que la eficiencia de remoción de fósforo depende de las propiedades del sustrato, longitud del humedal y tiempo de retención.

Según García & Corzo (2008), el tipo de vegetación utilizado para este tipo de sistema incluye a carrizos, espadaña y junco.

Figura IV-3 Sección transversal de un HAFSSH



Fuente: Hoffman et al. (2011)

b.2. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical (HAFSSV)

Estos sistemas se caracterizan por tener un flujo de ingreso vertical e intermitente. Consisten en zanjas o lechos que se encuentran rellenos por un sustrato de profundidad entre 0.5 a 0.8 m y de tipo heterogéneo, ya que, se disponen en tres capas horizontales de distinta granulometría que se incrementa con la profundidad del lecho. Así, García & Corzo (2008), indica que la capa más superficial es de arena gruesa, la intermedia de grava y la del fondo de grava gruesa, de manera que, el paso del afluente por el lecho no sea excesivamente rápido ni lento. En este sustrato se siembra la especie vegetal emergente.

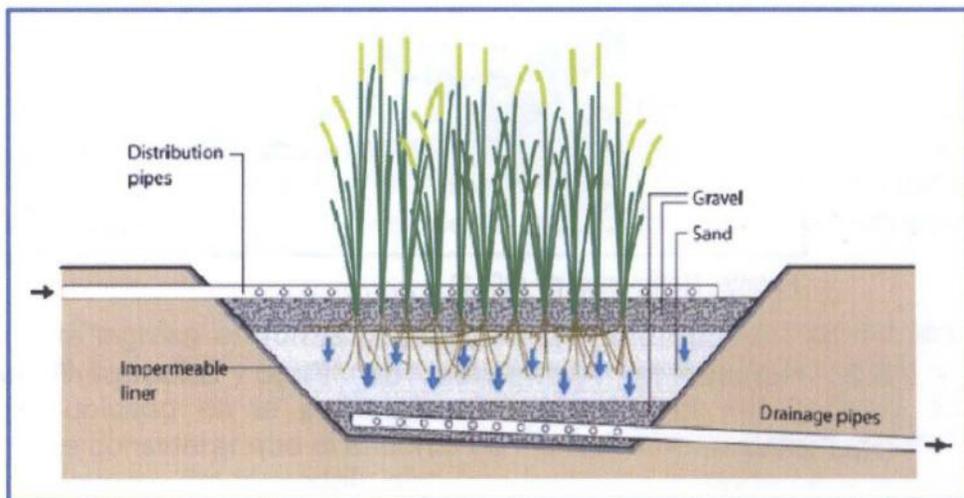
El afluente ingresa mediante un flujo vertical descendente (de arriba hacia abajo) a través de un sistema de tuberías dispuestas sobre la superficie en forma radial o a lo largo del lecho (ver Figura IV-4). El afluente se infiltra a través del sustrato, distribuyéndose mejor en toda la altura del sustrato y mejorándose el contacto del afluente con las raíces de las plantas. Y el efluente tratado se recoge mediante redes de tuberías perforadas situadas en el fondo y a lo largo del lecho. La aplicación del afluente se efectúa de forma intermitente para preservar y estimular al máximo las condiciones aeróbicas, adicionalmente, se suele



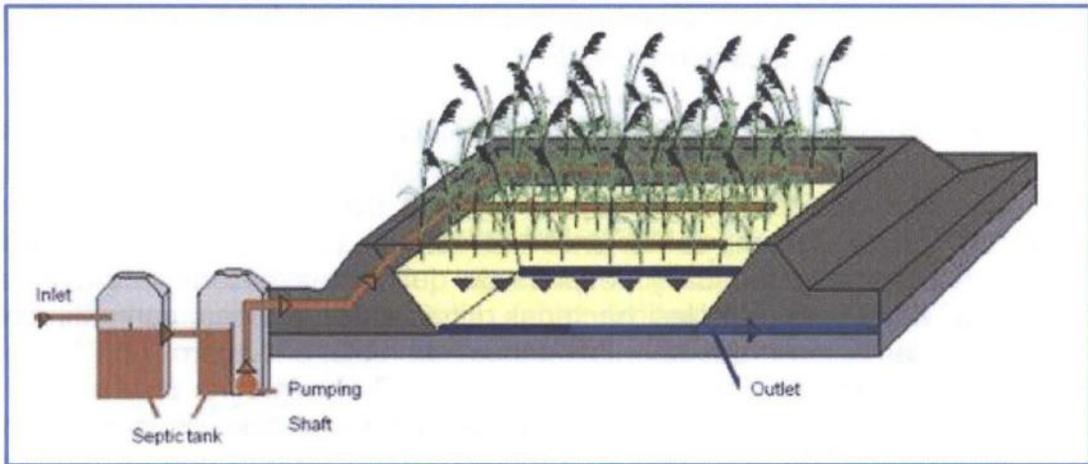
Los sistemas de flujo vertical tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales y requieren una menor superficie para tratar determinada carga orgánica. Sin embargo, son más susceptibles a la colmatación (Sanchez, 2011).

Este tipo de humedal no ha sido muy investigado, sin embargo, Ridderstolpe, citado por Hoffman et al., (2011), reporta eficiencias de remoción de: 90-99% para DBO, 90-99% para SST, 40-60% para el N-total. Al igual que los HAFSSH, la eficiencia de remoción de fósforo dependerá de las propiedades del sustrato, longitud del humedal y el tiempo de retención.

Figura IV-4 Esquema en corte de un HASSFV



Fuente: Hoffman et al., (2011)



Fuente: Fehr, 2003, tomado de Hoffman et al., (2011)

4.1.5. Mecanismos de remoción de nutrientes en HAFSS

a. Mecanismos de remoción de nitrógeno

El nitrógeno en aguas residuales domésticas se encuentra en forma de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) y nitrógeno orgánico (N-org). Usualmente no se encuentra en concentraciones significativas los nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-), a menos que, sea un agua residual proveniente de fuentes industriales como farmacéuticas, alimentarias, de fertilizantes, entre otras.

Se debe considerar que el afluente a tratar en los sistemas de humedales artificiales provienen tratamientos previos como sistemas de pre-tratamiento y tratamiento primario, por esa razón, las formas de nitrógeno que predominan en estos afluentes son N-org y N-amoniacal.

El N-org que ingresa al humedal está asociado a material particulado como sólidos en suspensión presentes en el afluente. Y su descomposición o mineralización es relativamente rápida, transformándose a N-amoniacal e incrementando su concentración en el afluente.

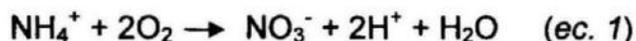
Entonces, la mayor parte del nitrógeno que ingresa al humedal, está presente en forma N-amoniacal o en forma de un compuesto inestable que es fácilmente transformado a N-amoniacal.

Generalmente, todo el nitrógeno amoniacal se convierte en amonio o ión amonio (NH_4^+) mediante el proceso de amonificación.

En ese sentido, la remoción del nitrógeno estaría asociada a la remoción del NH_4^+ . Por lo que los principales mecanismos de eliminación de nitrógeno son la nitrificación seguida por la desnitrificación.

Nitrificación

La nitrificación es realizada por las bacterias autótrofas aeróbicas (nitrificantes) que transforman el amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) por oxidación (ver ecuación ec. 1).



Como menciona Lara (1999), el proceso de nitrificación se lleva a cabo cuando se tienen condiciones aeróbicas, la suficiente alcalinidad, la temperatura adecuada y después de que la mayoría de la DBO ha sido removida, para que las bacterias nitrificantes puedan competir con las bacterias heterótrofas por el oxígeno disponible.

Sin embargo, la condición limitante para este proceso es la disponibilidad de oxígeno. En ese sentido, Sánchez (2011) reporta que se requiere 4.6 mg de oxígeno para oxidar cada mg de NH_4^+ . Rexford, citado por Miglio (2003), adiciona que la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual se debe encontrar entre 0.6 a 1 mg/L, asimismo que la temperatura del agua residual es influyente, debiendo ser su valor superior a 10°C.

La disponibilidad de oxígeno está relacionada con la eficiencia en la transferencia de oxígeno atmosférico en los humedales artificiales. En el caso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS), el oxígeno es suministrado por las raíces de la planta, entonces la transferencia de oxígeno va a depender de la profundidad de sus raíces. Así, la eficiencia de remoción del nitrógeno está asociada a la profundidad de penetración de las raíces, por lo que, en el diseño de este tipo de humedal se debe considerar que la profundidad del sustrato o lecho filtrante debe ser igual a la profundidad de penetración potencial de las raíces.

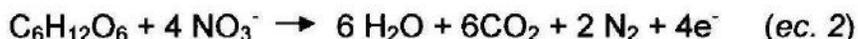
En los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV) se tienen muy buenos rendimientos de conversión del N-amoniaco a nitrato por el carácter aeróbico de la gran parte de su sustrato. Varios autores reportan que el porcentaje de remoción de N-amoniaco llega hasta 90%.

Desnitrificación

Es un proceso por el cual se remueven los nitratos (NO_3^-) formados previamente en la nitrificación. Este proceso se lleva a cabo bajo condiciones anaeróbicas, siendo las bacterias anaerobias encargadas de transformar el NO_3^- en compuestos gaseosos como el óxido de nitrógeno (N_2O) y el nitrógeno molecular (N_2) que se liberan a la atmósfera. Ocurre en dos etapas, en la primera el NO_3^- se reduce a N_2O , posteriormente, el N_2O es reducido a N_2 atmósfera (ver ecuación ec. 2).

A pH bajos, la segunda etapa de la desnitrificación se inhibe, liberándose todo el nitrógeno en forma de gas N_2O a la atmósfera, siendo el N_2O un gas de efecto invernadero, por lo que, el pH del agua residual debe

mantenerse por encima de 6, de manera que el mayor porcentaje de nitrógeno sea liberado en forma de gas N_2 (Silva, 2009)



Este proceso se lleva a cabo cuando existen condiciones anaeróbicas, una adecuada fuente de carbono y de temperatura.

En general, las condiciones anaeróbicas están garantizadas en muchos humedales artificiales, y la temperatura del agua depende de las condiciones meteorológicas del lugar, así que la disponibilidad de una adecuada fuente de carbono es un factor limitante en la desnitrificación. Lara (1999) menciona que la fuente de carbono en los humedales artificiales está en forma de DBO, estimando que se requieren entre 5 a 9 g de DBO para desnitrificar 1 g de NO_3^- .

Los HAFSSV tienen dificultades para eliminar el NO_3^- , reportándose porcentaje de remoción entre 30 – 40%. Sin embargo, la remoción de nitratos puede incrementarse proporcionándole condiciones anaeróbicas al humedal y mayores tiempos de retención.

Otros mecanismos para la remoción de nitrógeno es la asimilación de amonio o nitrato por parte de la planta, principalmente en forma de ion amonio (NH_4^+) porque es el más abundante. En nitrógeno se incorpora a la biomasa, eliminándose entre 10 - 20%. Sin embargo, es importante considerar que al morir las partes aéreas de la planta, durante su senescencia anual, el nitrógeno puede retornar al humedal, por este motivo se recomienda podar la vegetación justo antes de este período.

Además, se puede remover el nitrógeno por adsorción directa al sustrato, volatilización del amonio y asimilación microbiana, siendo estas de poca importancia.

b. Mecanismos de remoción de fósforo

El fósforo presente en el agua residual, lo encontramos en tres formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. Siendo el último, un constituyente menor del agua residual y como los polifosfatos requiere una posterior descomposición a una forma más asimilable como lo son los ortofosfatos. Entonces, se considera que la mayoría de fósforo se encuentra en forma de ortofosfatos (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4), representando entre el 50 – 70% del fósforo total en el agua residual.

La remoción de fósforo en estos sistemas es complicado, ya que, no es fácilmente degradable por acción microbiológica.

Los ortofosfatos se pueden remover en una pequeña cantidad por captación o asimilación por parte de la planta, los autores estiman que se puede remover hasta un 10% durante su crecimiento. Otra forma, que es la principal, es por adsorción en la superficie del sustrato. Este mecanismo de remoción se disminuye durante la vida útil del HAFSS, debido a que su capacidad de adsorción disminuye con el tiempo porque se van limitando los sitios de adsorción en el sustrato. Es por eso, que se recomienda

reemplazar el sustrato cuando la remoción sea muy baja, sin embargo, este procedimiento no es económicamente viable (Hoffmann, Platzer, Winker, & Von Muench; 2011). Además, Sánchez (2011) menciona que se han realizado investigaciones en las cuales se adiciona sales de aluminio y hierro en conjunto para remover mayor cantidad de fósforo mediante la precipitación, no obstante, no es del todo recomendable la utilización de estas sales ya que se puede formar otras sustancias más tóxicas como sulfuro de hierro.

García & Corzo (2008), afirma que para los HAFSS se suelen eliminar entre el 10 – 20% del fósforo. Sin embargo, Peña, Van Ginneken & Madera (2003) reporta valores de remoción para HAFSSV entre 30 – 50%.

a. Generalidades

Typha domingensis Pers. es una planta acuática monocotiledónea perteneciente a la familia Typhaceae, conocida comúnmente como “Totora” o “Anea”, distribuida geográficamente en América del Sur, del Norte y del Centro (Salas, 2009). Es propia de ambientes lénticos de agua dulce como lagos, presas, pantanos, zonas inundadas, y de ambientes lóticos como manantiales, zanjas y canales. Sin embargo, se conoce que en condiciones de baja calidad, es predominante, ya que desarrolla mayor talla y tiene mayor exigencia de calidad de agua (Curt, 2012b).

Esta especie pertenece a climas templados o templado-fríos, el rango de temperatura en el que se desarrollan se encuentra entre 10°C y 30°C. Florece y fructifica durante todo el año (Raúl, 2012). Es una planta robusta, la vaina de su hoja está abierta en su extremo superior y en la parte interna se observan a simple vista glándulas mucilaginosas oscuras. No presenta aurículas marcadas. La lámina es de color verde pálido a amarillento, y es estrecha. Su anchura es de 5 – 12 mm. Sus flores femeninas presentan escamas estériles, de color marrón claro, translúcidas, frágiles y de forma ovobada-apiculada. La inflorescencia femenina es estrecha y de color canela (Curt, 2012b).

En el Perú, se encuentra ampliamente distribuida Amazonas, Ancash, Cajamarca y Lima (MINAM, 2013). Asimismo, se distribuye en los humedales costeros del Perú, y es la especie dominante de la asociación vegetal Totoral del Refugio de Vida Silvestre “Pantanos de Villa” (Aponte & Ramírez, 2011; INRENA., 1998)

b. Características morfológicas

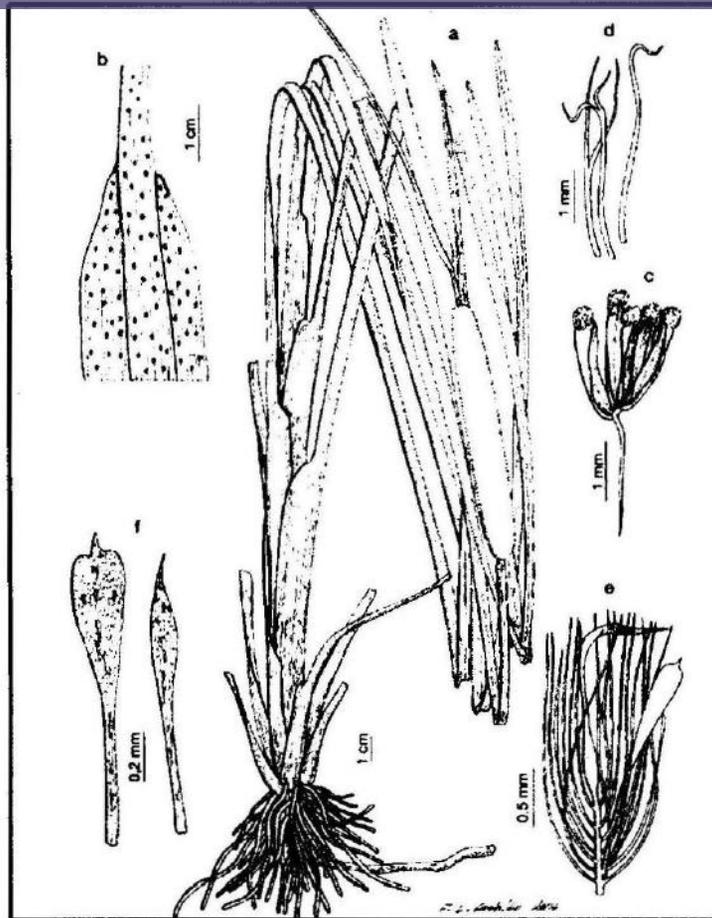
Es una hierba enraizada, emergente y de ciclo de vida perenne o anual en condiciones desfavorables, que llega a tener hasta 4 m de altura, de las cuales al menos la mitad está sumergida bajo el agua y la otra parte se encuentra por encima de la superficie; y una profundidad de raíces de 30 cm (Mufarrege, 2012; Vibrans, 2009).

Posee hojas carnosas de longitud variable, que a veces sobrepasan la altura inflorescencia o espiga, esas hojas son acintadas e tienen de 40 – 120 cm de largo por 0.5 – 2 cm de ancho, con la cara superior plana y la inferior ligeramente convexa. Sus vainas foliares están provista de abundantes glándulas mucilaginosas de color pardo distribuidas por toda la parte interna.

Presenta inflorescencias espiciformes de color pardo claro, con una o más brácteas foliáceas caedizas y raquis secundarios subpiramidales, de 0.4 – 1 mm, escalariformes, a veces truncados. La inflorescencia masculina, denominada espiga cónica, es de 28 – 39 cm de largo y de 1.3 – 2.4 cm de ancho, está separada de la femenina por una porción desnuda del eje de 1

– 6 cm; mientras que, la inflorescencia femenina (espiga femenina cilíndrica) es de 32 – 41 cm de largo y 1.4 a 1.9 cm de diámetro. Las flores masculinas presentan bractéolas de 3 – 4 mm, las cuales son de filiformes a espatuladas, simples a ramificadas, algunas veces con incisiones que forman segmentos largos, frecuentemente coloreadas por puntos pardos oscuros en el ápice, de 2.5 a 3.5 mm de largo; asimismo presenta entre 1 – 5 estambres – total o parcialmente soldados en la base –, filamentos de 2 – 4 mm de largo, anteras de 1.6 – 3.5 mm de largo y 0.1 – 0.2 mm de ancho, con el ápice del conectivo variable, de obtuso hasta apiculado, y polen en mónadas.

De la misma manera, las flores femeninas presentan entre 1 – 4 bractéolas largas y delgadas de 4 – 8 mm por flor, con la parte superior rómbica acuminada en el ápice, más largas que los pelos del ginóforo (estructura que levanta el ovario); las bractéolas, en su mayor parte son translúcidas y con algunas células de color naranja pardusco; además presentan ovario fusiforme (con extremos que se alargan y la parte media ancha) de 0.7 – 1.5 mm, con ginóforo provisto de números pelos dispuestos en varios verticilos que sobrepasan los estigmas, estos ginóforos son lineares con células aisladas de color naranja pardusco; su estigma es linear y filiforme en el ápice, de color pardo claro y largo de 0.5 – 1.5 mm; y su fruto fusiforme de 1 – 1.5 mm de largo (Castroviejo et al., 1986; Raúl & Santamaría, 2012; Vibrans; 2009).



Fuente: Vibrans (2009)

Nota:

a) hábito, b) cara adaxial de la vaina foliar, c) flor masculina, d) bractéolas masculinas, e) flor femenina, f) bractéolas femeninas.

c. Ciclo de desarrollo

Como se indicó anteriormente, la totora es una planta herbácea perenne. Su carácter perenne se debe a que poseen un sistema radicular rizomatoso perenne, pero el ciclo de desarrollo de la planta es anual.

En la primavera tardía, época favorable, la planta brota a partir de yemas ubicadas en los rizomas, y se desarrolla hojas nuevas. La asimilación fotosintética permite la producción de carbohidratos que redundan en el desarrollo de un tallo subterráneo rastrero, formación de nuevos rizomas y almacenamiento de carbohidratos de reserva por engrosamiento de los rizomas.

En verano, la totora emite un tallo aéreo, generalmente sin hojas, que lleva en su extremo inflorescencias. Los frutos maduran aproximadamente un mes más tarde. En otoño, la parte emergente de la planta senesce y toda la parte aérea se seca. La diseminación de los frutos se produce más tarde,

generalmente a lo largo del invierno; es entonces cuando los pelos adquieren un cierto aspecto canoso, debido a que los pelos que acompañan a los frutos quedan a la vista. En la siguiente primavera se inicia un nuevo ciclo con el brote, desde los rizomas, de nuevas hojas.

Con la sucesión de ciclos anuales de desarrollo, la planta va colonizando poco a poco nuevas áreas del humedal, dando lugar en la parte arraigada en el sustrato, a un denso entramado de rizomas y raíces, y en la parte emergente, a una agrupación espesa de hojas y tallos en la que no pueden distinguirse plantas individuales. Por esta razón, las totoras siempre aparecen en los humedales formando colonias densas, en cuyo interior difícilmente crece otra especie vegetal; además tienen el aspecto de monocultivos rodeados de una franja en la que aparecen otras plantas acuáticas e higrófitas (Curt, 2012b).

d. Estructuras vegetativas

La totora posee las siguientes estructuras vegetativas:

d.1. Raíz

Las raíces de la totora por su origen son adventicias y se originan a partir de rizoma maduro y está conformado, principalmente, por raíces secundarias, que forman penachos delgados. Su función es brindar anclaje a la planta en el fondo del sustrato, su desarrollo es horizontal, y crece de manera paralela a la superficie del suelo. Su diámetro varía en torno a 1mm de grosor en función a la edad de la planta y al medio de suelo donde crece (ABLT, 2001).

d.2. Rizoma

Esta estructura es un tallo modificado o tallo subterráneo que se desarrolla inmediatamente después de la raíz y también crece de manera paralela a la superficie del suelo. Su estructura interna está compuesta por un cilindro central con muchos haces libero-leñosos. Su corteza es de color blanco, con nudos a cada 2 a 6 cm, desde donde brotan las yemas que posteriormente se convierten en tallos. Los rizomas acumulan gran cantidad de sustancias de reserva, las que permiten a las plantas de totora mantenerse durante los periodos de sequía (estado de latencia), así como, en épocas favorables, las yemas aprovechan esas reservas para germinar.

Los rizomas y las yemas se encuentran protegidas por unas hojas modificadas de color marrón claro amarillo, a manera de escamas (catáfilas) (ABLT, 2001; Osnaya, 2012).

Los rizomas pueden tener diferentes denominaciones según el grado de madurez como siphi, sacca, etc. Considerando estas características, se ha detectado la presencia de diferentes tipos de rizomas o tallos subterráneos, de acuerdo a su edad y forma, cuyas características son:

- **Rizoma maduro:** Presenta una coloración café marrón brillante denominado comúnmente como “saphi” o “sippi”, caracterizándose por poseer una capa lignificada y un cilindro central, en donde se encuentra muchos haces libero leñosos, dispuestos en círculos concéntricos con una corteza de color blanco, y cuando llega a envejecer toma una coloración marrón oscuro acumulando gran cantidad de sustancias de reserva.
- **Rizoma joven o tierno:** Presenta coloración blanca, llamado “sacka” o “sacca”, posee los tejidos vegetales de un rizoma adulto pero no presenta coloración, además de no acumular sustancias de reserva. Este tipo de rizoma es utilizado como alimento humano, debido al alto contenido de niveles de yodo.
- **Rizoma del ápice:** Es la parte terminal, apical del tallo subterráneo que no posee raíces adventicias, presentando un tejido meristemático con una coloración mayormente blanquecina que se encuentra en constante crecimiento, constituyendo así la base de la expansión de la totora (ABLT, 2001).

d.3. Tallos

Varían de 1 m a 4 m, erectos, remotos o próximos entre sí. Son lisos, trígono, verde-amarillentos cuando secos. Presentan vainas foliares pardo oscuro, sin láminas (Osnaya, 2012).

De acuerdo a su ubicación, se clasifica en dos partes:

- **Tallo aéreo:** Parte del tallo que sobresale del agua, es de color verde intenso debido a la clorofila que contiene. En su interior presenta tejido parenquimatoso clorofílico (tejidos simples no diferenciados). Su sección varía de forma de triangular a circular, dependiendo de la edad de la planta, situación climática, nutrientes del sustrato de fondo, entre otros. La parte fuera del agua presenta un tejido parenquimático denominado “aerénquima” que no tiene color y contiene grandes espacios intercelulares llenos de aire, que facilita la flotación en el agua y la llegada de aire a los órganos sumergidos.

Es importante señalar que el tejido parenquimático, desarrolla funciones de almacenamiento, respiración y en algunos casos realiza la fotosíntesis.

- **Tallo sumergido:** Nace en el rizoma maduro y alcanza hasta el nivel de agua, tiene una parte blanquecina (por falta de clorofila) denominada “chullo” que almacena disacáridos y se usa como alimento humano. En su conjunto, los tallos pueden crecer de 30 cm a 100 cm de altura aproximadamente, cada 4 meses, este crecimiento está en función del sustrato, hábitat y ambiente, pudiendo alcanzar alturas de 2 a 6 metros.

El tallo que se encuentra sumergido, contiene clorofila, pero en la parte basal tiene una coloración blanquecina, denominada comúnmente como “chullo”, debido principalmente a que en esa parte no inciden los rayos solares. Almacenan disacáridos que le dan un sabor dulce y agradable (ABLT, 2001; Osnaya, 2012).

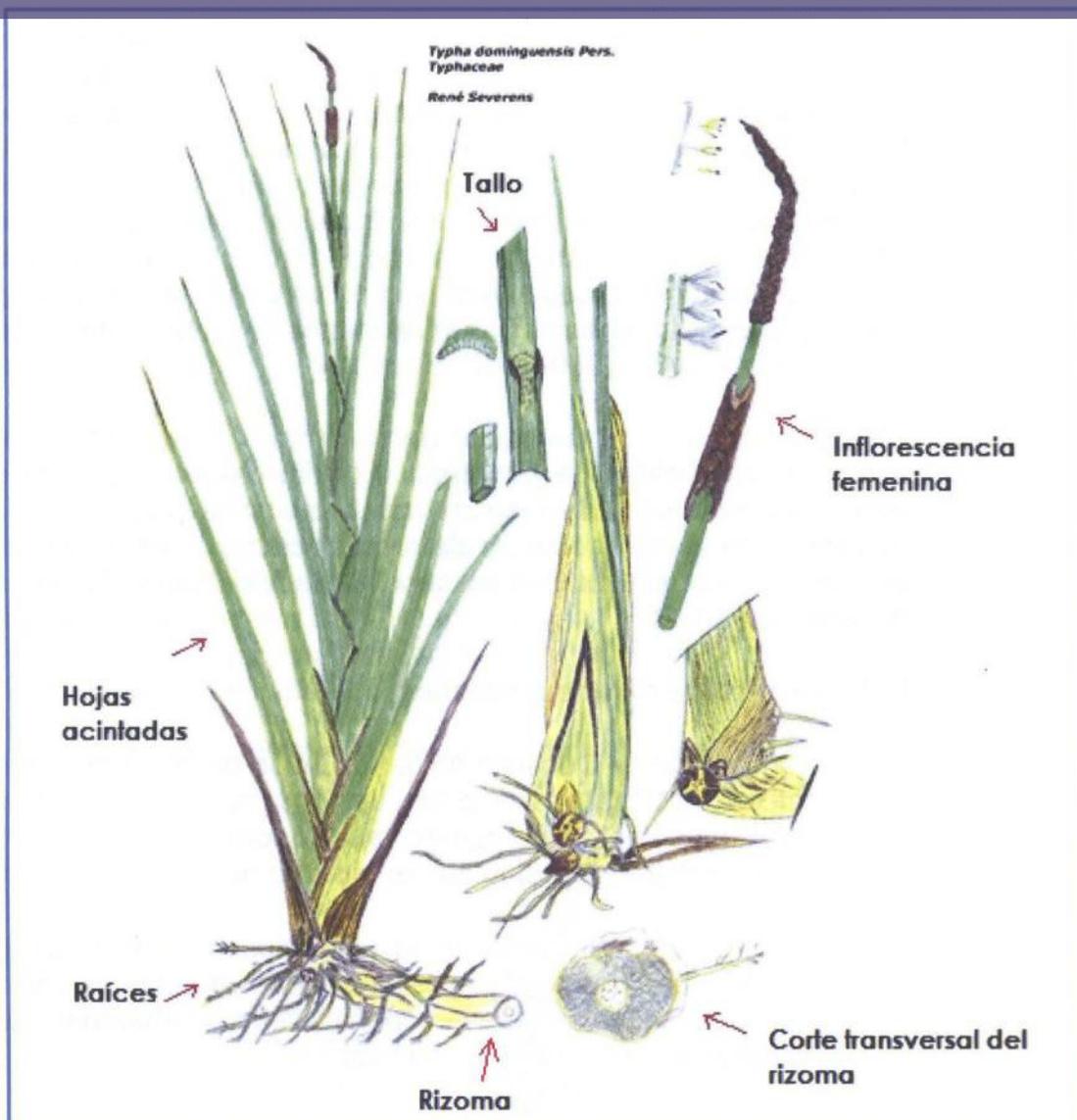
d.3. Inflorescencia

La totora tiene la inflorescencia tipo umbela, caracterizada porque las primeras ramificaciones dan lugar a su vez a otras umbelas pequeñas y la umbelilla dispuesta en sus ejes terminales. Tiene un número variable de flores, en el que cada eje terminal está cubierto de una bráctea escamosa de color café oscuro de 3 a 5 mm, de longitud.

La flor está rodeada por un conjunto de hojas pequeñas que rodean a los verticilos fértiles de las flores, y carecen de sépalos y pétalos.

En sus verticilos externos está representada por 4 escamas que hacen las veces de un perigonio haploide en algunas dicotiledóneas. El perigonio es tetrámero actinomorfo; el androceo está dispuesto en dos verticilos, las escamas son semejantes a las glumillas de las gramíneas y finalmente se observa el último verticilo floral.

Una vez madura la inflorescencia, forma la semilla que por acción del viento cae al agua, dando lugar posteriormente a una nueva planta de totora como acción de una regeneración natural de la totora, siempre y cuando las condiciones naturales y antrópicas lo permitan (ABLT, 2001).



Fuente: Adaptado de Prosdij (2011)



En las plantas, la remoción o eliminación de los contaminantes se realiza mediante mecanismos de fitorremediación. La fitorremediación se define como el uso de plantas verdes para eliminar o reducir la peligrosidad de los contaminantes. Es una de las técnicas biológicas que más atención ha recibido y que tiene como objetivo degradar, asimilar, metabolizar o desintoxicar metales pesados, compuestos orgánicos y compuestos radioactivos por medio de la acción combinada de plantas y microorganismos con capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener, degradar o transformar sustancias contaminantes a formas menos tóxicas (Vera, 2008).

La aplicación de la fitorremediación presenta algunas limitaciones, tales como, la profundidad de penetración de las raíces, la fototoxicidad en áreas fuertemente contaminadas, los tiempos de proceso prolongados con respecto a otras técnicas de remediación y la biodisponibilidad de los compuestos que pueden limitar la captación (López, Gallegos, Pérez & Gutiérrez, 2005).

Entre los mecanismos se presentan:

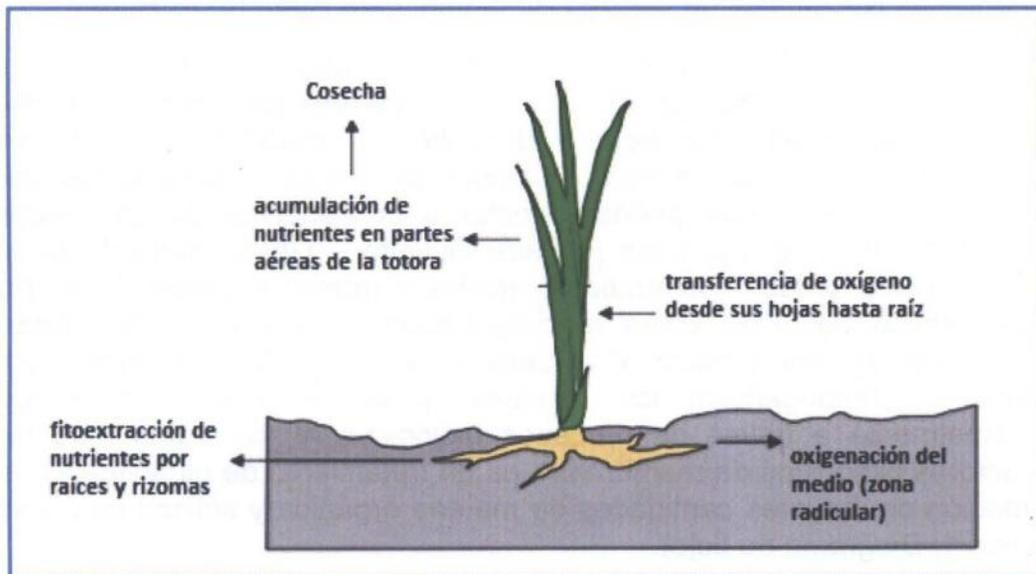
- **Fitoextracción:** Consiste en la absorción de contaminantes por las raíces, es la capacidad de las plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follajes. Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en plantas que acumulan metales.
- **Rizofiltración:** Se basa en la utilización de plantas crecidas en cultivos hidropónicos, se prefieren raíces de plantas con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, adsorber, concentrar y precipitar contaminantes.
- **Fitoestimulación:** También denominada rizodegradación, en este mecanismo las plantas generan los exudados radiculares que estimulan el crecimiento de los microorganismos nativos capaces de degradar compuestos orgánicos.
- **Fitoestabilización:** Es un mecanismo que utiliza a la planta para desarrollar un sistema denso de raíces que le permite reducir la biodisponibilidad y la movilidad de los contaminantes evitando el transporte a capas subterráneas o a la atmósfera.
- **Fitodegradación:** Consiste en la transformación de los contaminantes orgánicos en moléculas más simples. En determinadas ocasiones, los productos de la degradación le sirven a la planta para acelerar su crecimiento, en otros casos los contaminantes son biotransformados.
- **Fitovolatilización:** se produce a medida que las plantas en crecimiento absorben agua junto con los contaminantes orgánicos

solubles. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse a la atmósfera (López et al., 2005).

En el caso de la especie utilizada, totora, el mecanismo principal que utiliza para remover nutrientes es la fitoextracción, mediante el cual sus raíces y rizomas captan una concentración determinada de los nutrientes presentes en el agua residual, es decir, absorben los nutrientes en su forma aniónica y lo acumulan en sus estructuras vegetativas: tallo y hojas como biomasa, que es utilizada por la planta para su desarrollo, y también puede eliminarse mediante la cosecha de las hojas marchitas (Mufarrege, 2012).

Asimismo, gracias a la epidermis delgada que presentan sus hojas y a los grandes espacios intercelulares del tejido aerénquima, existe una transferencia de oxígeno desde sus hojas hasta la raíz, liberando así oxígeno al medio acuoso y creando un microambiente aerobio alrededor de su zona radicular. Este microambiente estimula el desarrollo de microorganismos aerobios responsables de la degradación de contaminantes como materia orgánica y nutrientes, de modo que se disminuye la carga contaminante del sistema (Curt, 2012a).

Figura IV-8 Mecanismos de remoción de nutrientes de la totora



Fuente: Adaptado de Mufarrege (2012)

La empresa Esmeralda Corp S.A.C, fundada hace treinta años, se localiza en el Km 18.5 Autopista Panamericana Sur s/n Villa Baja - Chorrillos, cerca del cruce entre la Av. Huaylas y Panamericana Sur, en las coordenadas UTM 320984 Este y 8649589 Norte (zona 18 S), a una altitud de 13 m.s.n.m (ver Figura IV-9). Esta empresa se dedica a brindar servicios de almacenamiento de productos congelados, fríos y secos; alquiler de espacios, al proceso de productos cárnicos e hidrobiológicos, entre otros. Actualmente, en las instalaciones de la Esmeralda Corp S.A.C. se han instalado diferentes empresas destinadas a sectores productivos como agroindustrial, hidrobiológico (procesamiento de pota), frigorífico e industria cárnica.

En las instalaciones de la empresa Esmeralda Corp S.A.C también se encuentra ubicada la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (ver Figura IV-10). La PTAR comenzó a operar los primeros meses del año 2011, encontrándose siempre en proceso de implementación continua. Se encarga de tratar las aguas residuales provenientes de las diferentes actividades productivas desarrolladas dentro de las instalaciones de la empresa, de modo que, se reduzcan los impactos ambientales negativos que se puedan generar, haciendo uso de metodologías que le permitan cumplir con la normativa vigente como los Límites Máximos Permisibles referentes a efluentes industriales y los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua).

En la PTAR, los efluentes se tratan en cuatro unidades de tratamiento, donde se aplican procesos fisicoquímicos y biológicos bajo condiciones anaerobias y aerobias, según el orden que se describe: (i) unidades de pre-tratamiento (tamiz tornillo, caja de registro y cámara de bombeo), para la remoción de materiales gruesos que puedan afectar a la eficiencia del tratamiento; (ii) tratamiento primario (flotación por aire disuelto – DAF), mediante el cual se remueven los sólidos suspendidos, aceites y grasas a través de un proceso fisicoquímico conocido como la coagulación y floculación; (iii) tratamiento secundario (reactor secuencial de tandas), que es sistema de lodos activados donde se homogenizan los caudales y se remueve materia orgánica principalmente a través de procesos biológicos; y (iv) tratamiento terciario (reactores biológicos de membrana), es un tratamiento de ultrafiltración para la remoción de mayores cantidades de materia orgánica y sólidos muy finos (ver Anexo 1: Diagrama de flujo).

La empresa Esmeralda Corp S.A.C., incluyendo la PTAR, se encuentra dentro del área de amortiguamiento del Refugio de Vida Silvestre “Pantanos de Villa” (RVSPV), por lo que, sus actividades podrían influenciar significativamente a esta área natural, al ambiente y también a la población circundante.

Al encontrarse dentro del área de amortiguamiento va a presentar características físicas similares. En ese sentido, el tipo de suelo que presenta es franco arenoso, de drenaje pobre y afloramiento de la napa freática muy cerca de la superficie. Su textura es moderadamente gruesa, son pocos profundos debido al drenaje imperfecto, presentan escurrimiento superficial

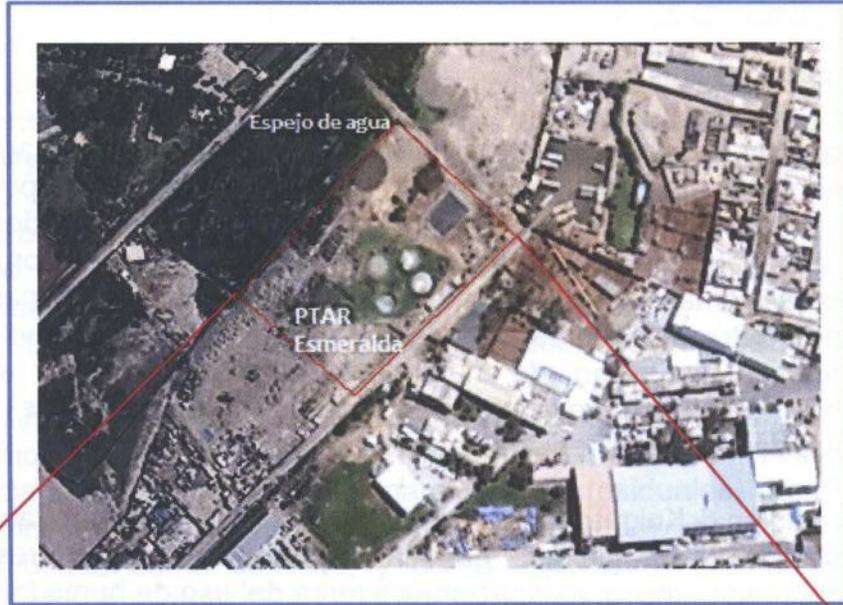
lento, con problemas de excesiva salinidad (mayor a 16 mS/cm), susceptible a inundación y profundidad efectiva de raíces de 65 cm.

El clima que presenta la zona es típico de la costa central, con precipitaciones que alcanzan un promedio anual de 60 mm. Su temperatura media anual es de 18.6°C, y las temperaturas máximas y mínimas de 22.5°C y 15.7° respectivamente. La humedad relativa fluctúa entre 85 y 99%.

Se encuentran integrado al sistema hidrológico del río Rímac, a través del acuífero Ate-Surco-Chorrillos, en una depresión natural que permite el flujo de aguas del acuífero –que a su vez se recarga de las aguas del lecho del río Surco, de infiltraciones por el riego de las áreas circundantes (agrícolas, jardines y parques) y de la red de canales-. Esto se manifiesta en la formación de puquiales u ojos de agua en las cotas ligeramente más altas, encontrándose siete (07) puquios en la zona de Villa Baja, donde se encuentra ubicada la Planta de Tratamiento.



Ubicación y vista de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la empresa Esmeralda Corp S.A.C.



La presente investigación se desarrolló entre los meses de agosto del 2013 hasta agosto del 2014.

4.4. MARCO HISTÓRICO

La utilización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales se remonta a principios del siglo XX, a pesar que su concepto se desarrolló mucho antes. Antiguas civilizaciones como China y Egipto descargaban sus aguas residuales en humedales naturales, pues las concibieron como mejores receptores de las aguas residuales, por desempeñar un papel purificador importante (Brix, 1995). Esta tendencia conllevó a que muchos humedales o pantanos se saturaran de nutrientes, y posteriormente, se degradaran ambientalmente, toda vez que estos lugares fueron utilizados como sitios de descarga de las aguas residuales y no como tratamiento.

Según Kadlec & Knight (1996), desde el año 1912, los humedales naturales se han utilizado probablemente para la disposición de aguas residuales (EPA, 2000). Sin embargo, investigaciones acerca del uso de humedales artificiales o wetlands para el tratamiento de aguas residuales señalan que se inició en Europa, en la década de 1950. En 1953, la Dr. Kathe Seidel realizó investigaciones en el Instituto Max Planck (Alemania) sobre la remoción de metales pesados e hidrocarburos (fenol y sus derivados) de aguas residuales usando humedales artificiales y como vegetación emergente *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla (junco de laguna) (Brix, 1995). Las investigaciones realizadas por la Dra. Seidel resultaron en el desarrollo de un sistema conocido como “Max Planck Institute Process” o “Sistema Krefeld”, que conlleva al desarrollo de varias etapas sucesivas utilizando macrófitas como plantas emergentes (Brix, 1995; CENAGUA, 1999).

Así mismo, en 1963, el Dr. Kikuth del Instituto für Bodenkunde de la Universidad de Göttingen, diseñó un sistema de tratamiento de flujo horizontal subsuperficial denominado “The root zone method”. Este sistema se encargaba de remover nutrientes y sólidos suspendidos de aguas residuales domésticas, usando como sustrato un suelo arcilloso –que contenía aditivos de calcio, hierro y aluminio para mejorar la estructura del suelo y la capacidad de precipitación de fosfatos– y como vegetación emergente *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud (carrizo o caña común) (Brix, 1995; CENAGUA, 1999; Estrada, 2010). Inicialmente, este sistema fue muy popular en Europa e Inglaterra y se construyeron cientos de estos; desafortunadamente, hubo problemas con el funcionamiento del sistema, ya que, el sustrato no era lo suficientemente permeable y poroso para permitir que el agua fluya de manera adecuada. Debido a eso, se presentó una elevada resistencia hidráulica y se demandó velocidades de flujo más bajas, limitando así el caudal a tratar. A fin evitar este problema, actualmente es utilizado como sustrato la grava, siendo más recomendable para cargas hidráulicas altas (Arias, 2004; Strauffer, 1998).

A nivel mundial, el interés por este tipo de tratamiento se intensificó durante el periodo de 1980 a 1990, donde diversas instalaciones usando este sistema de tratamiento aparecieron en países de Europa y América del Norte (Quipuzco,

2007). Su objetivo era tratar diferentes tipos de efluentes residuales procedentes de fuentes domésticas, industriales y agrícolas (EPA, 1999).

Así, en Europa existen más de 5000 sistemas de tratamiento mediante el uso de humedales artificiales (Berezowsky, 1996; Stottmeister et al., 2003); predominando los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial como tratamiento secundario para efluentes domésticos e industriales. Utilizándose mayoritariamente arena y grava como sustrato y carrizo como vegetación emergente para este tipo de sistemas (EPA, 1999; EPA, 2000b). En Inglaterra, el uso de estos sistemas se encuentra ampliamente difundido por todo el territorio. También se encuentran en países como Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia, Holanda, Hungría, Luxemburgo, Suecia y Suiza (Berezowsky, 1996; Moore, Lafer & Funk, 1994; Radoux & Kemp, 1982).

En el caso de América del Norte, el país que más ha desarrollado el tema de humedales artificiales es EE.UU. El tipo de tratamiento más utilizado es el humedal artificial de flujo superficial para aguas residuales domésticas, industriales y mineras (Mitsh & Wise, 1998; Vymazal, 2009). Siendo, la grava el medio más usado como sustrato; y como especies vegetales: juncos, espadañas, aneas y carrizos (EPA, 2000b). Actualmente, alrededor de 1000 humedales artificiales se encuentran funcionando en todo el país, predominantemente en la parte suroeste (EPA, 2004).

En la actualidad, los países que más están trabajando en este campo son: Inglaterra, EE.UU. y Australia, debido a la mayor cantidad de recursos económicos que estos países destinan a la investigación científica (Perez-Olmedilla & Rojo, 2000).

Trabajos de investigación previos

A continuación se describirán algunas investigaciones sobre el uso de Humedales Artificiales para tratamiento de aguas residuales, desarrolladas en diferentes partes del mundo:

En el año 2002, en la Universidad Agraria La Molina (UNALM) del Perú se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de un sistema conformado por dos pantanos o humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas, captadas de la red de desagües de la UNALM. Dichos humedales recibieron un afluente pre-tratado por cilindros sedimentadores; uno de los humedales era horizontal y el otro vertical los cuales estaban instalados en serie, ambos presentaron un sustrato conformado por grava y arena, emplearon como especie emergente *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (carrizo) y operaron con flujo subsuperficial en condiciones de alimentación continua. El monitoreo del sistema se realizó durante los meses de noviembre del 2000 y enero del 2001, realizando muestreos semanales de los parámetros SST, DBO₅, DQO, sulfatos, coliformes fecales y enteroparásitos. Según el análisis del comportamiento de los SST y de la DBO₅ en el humedal horizontal, la remoción obtenida fue de 97.2% y 79.6% respectivamente. En este tipo de pantano la remoción de materia orgánica fue alta gracias a la efectiva mineralización. Asimismo, la DQO alcanzó un alto nivel de remoción de

84,3%, siendo el filtro de arena responsable de dicha remoción. En contraste, se observó un pobre desempeño en el humedal vertical.

En relación al parámetro sulfato, el nivel de remoción por etapas en el sistema de tratamiento fue significativo para ambos humedales con un 71,2% para el humedal horizontal y 52,85% para el humedal vertical. El nivel de eficiencia en la remoción de coliformes fecales y enteroparásitos en el sistema de tratamiento fue significativo alcanzando porcentajes de 98 y 62% respectivamente (Quipuzco, 2002).

Por otro lado, en el mismo año se realizó otra investigación en la Universidad Chia-Nan de Farmacia y Ciencias de Taiwan, cuyo objetivo fue analizar la puesta en marcha de un sistema conformado por un humedal artificial de flujo superficial (HAFS) y un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) conectados en serie, así como evaluar su eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo de efluente proveniente de la acuicultura. El sistema a escala piloto se instaló en Tainan County (Taiwan), conformado por dos humedales (HAFS y HAFSS) de 5 m x 1 m x 0,8 m (largo, ancho, alto) que fueron alimentados por un afluente proveniente de un estanque de crianza de peces de leche (*Chanos chanos* Forssk.), a caudales hidráulicos diferentes que variaba cada dos meses. El HAFS presentó una capa de sustrato compuesta por suelo local (arcilla) de 30 cm de profundidad sobre la cual se dejó una lámina de 40 cm del afluente a tratar, donde se sembraron dos especies: espinaca de agua (*Ipomoea aquatica* Forssk.) en la mitad del humedal y chéptica blanca (*Paspalum vaginatum* Sw.) en la otra mitad. Mientras que en el HAFSS presentó una capa de sustrato compuesta por grava de río de 60 cm de profundidad a través de la cual fluía el afluente a tratar, y se sembró como especie emergente al carrizo.

El monitoreo se realizó durante ocho meses, determinándose que la puesta en marcha del HAFSS fue más rápida que el HAFS, de un mes y de dos a tres meses respectivamente. Asimismo, se determinó que las eficiencias de remoción de nitrógeno fueron altas, de 86% a 98% para el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y de 95% a 98% para nitrógeno inorgánico total. Para el caso de la remoción de fósforo, se obtuvieron eficiencias entre 32% a 71%, cabe resaltar que las eficiencias en la remoción de nitrógeno y fósforo se vieron afectadas por los diferentes de caudales hidráulicos recibidos.

Además, se observó que el HAFS removió más nitrógeno inorgánico mientras que el HAFSS removió igual o más fósforo que el HAFS. Finalmente, se determinó que la remoción de nitrógeno amoniacal y de nitrito fue suficiente para reutilizar el agua en el sistema acuícola, sin causar daño a los peces (Ying-Fen, Shung-Ren, Deer-Yuan & Tze-Wen, 2002).

En ese mismo año, en el Instituto für Wasserwirtschaft und Ökotechnologie de Alemania se realizó una investigación para determinar el tipo de sustrato más eficiente para la remoción de fósforo de aguas residuales domésticas. Para lo cual se analizaron y compararon muestras de sustratos de tres humedales artificiales diferentes.

El primer sustrato provenía de un humedal artificial de flujo vertical (HAFV) que tenía como vegetación emergente el carrizo, éste estaba compuesto por arena de tamaño mediano, así como 5 a 10% de marga y arcilla. El segundo sustrato, de un humedal artificial de flujo horizontal (HAFH) que tenía como vegetación emergente el carrizo, y estaba compuesto por arena de tamaño mediano, 10% de grava y 1% de limaduras de hierro. El tercer sustrato, de un humedal artificial circular con pendiente de flujo horizontal, estaba compuesto por arena gruesa y 10% de grava. Según los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras se concluyó que la presencia o adición de limaduras de hierro al sustrato mejora la capacidad de éste para remover fósforo, eso se puede observar en el HAFH que obtuvo una remoción de 97%, el 60% de esta remoción estuvo asociada a la precipitación del fósforo (P) con hierro (Fe). Mientras que, para el HAFV el porcentaje de remoción es menor, específicamente de 27%. Cabe señalar que la remoción de P por acción de las plantas se encuentra alrededor del 50%, lo cual nos indica indirectamente el importante rol que cumplen las plantas en el funcionamiento de un humedal artificial, particularmente participa en los procesos de transformación microbiológica del P y la remoción directa a través de la unión a sustancias húmicas (Lüderitz & Gerlach, 2002).

En el año 2003, en la UNALM se realizó un estudio con la finalidad de evaluar el comportamiento de dos (02) humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) empleando dos plantas acuáticas: *Cyperus aff. ferox* y el carrizo, una en cada humedal. El afluente a tratar se obtuvo de la red de desagües de la UNALM y tuvo un tratamiento previo de sedimentación para remover sólidos sedimentables, este afluente ingreso a los humedales a un caudal de 2.2 m³/s para cada humedal con un tiempo de retención teórico de 24 h, aplicando una carga hidráulica aplicada de 0.12 m³/m²xd y una superficie específica de 8.3 m³/m²xd. Después de cuatro (04) meses de monitoreo se determinó que ambos sistemas presentaron una remoción de 85% de la materia orgánica, del 97% de los sólidos suspendidos y la disminución de coliformes fecales fue de 2 órdenes logarítmicas.

Estadísticamente, las dos (02) especies acuáticas utilizadas demostraron un comportamiento similar en cuanto a la remoción de contaminantes, además ambas se adaptaron rápidamente y tuvieron un buen desarrollo. Sin embargo, fue más fácil manejar al papiro por su menor tamaño. No se presentaron problemas de olores ni presencia de vectores. Finalmente, se puede añadir que el sistema estudiado presenta resultados promisorios para ser aplicado en zonas rurales y suburbanas que carezcan de redes de alcantarillado público, por sus costos y su facilidad de operación y mantenimiento (Miglio, 2003).

En el mismo año, en el Departamento de Investigación sobre Remediación del Centro de Investigación Ambiental en Alemania se realizó una investigación para evaluar el ciclo anual de la remoción de nitrógeno en el funcionamiento de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal (HASFH) en un clima templado. Dicho humedal se localizó a orillas de un lago artificial de una antigua mina de carbón a tajo abierto

ubicada en el sur de Saxonia-Anhalt (entre Weibenfels y Zeitz, en el centro de Alemania), el cual era alimentado por la capa superficial del lago, rica en amonio. El HASFH operó durante cuatro años (1995-2001), después de realizar los monitoreos pertinentes se determinó que en primavera y otoño las eficiencias de remoción dependen de la carga de nitrógeno en un modo lineal. Las eficiencias en invierno como en verano difieren extremadamente (media de las tasas de remoción de 0.15/0.7 g/m².d [11%/53%] en Enero/Agosto) y son independientes de la carga nitrógeno (0.7 a 1.7 g/m².d) en principio. Las oscilaciones de las tasas de remoción en primavera, que forman varios máximos, sugieren efectos estacionales específicos, causadas por la dinámica de la planta-fisiología, lo cual determina la eficiencia de la nitrificación, es decir, a través de suministro de O₂.

Asimismo, la nitrificación estuvo limitada por la temperatura durante todas las estaciones y, sorprendentemente en pleno verano, y adicionalmente restringido por otros aspectos estacionales que forman una clara relación entre el mínimo de nitrificación en Julio (tasa media de 0.43 g/m².d [32%]). Cabe resaltar que es de gran importancia el efecto del intercambio gaseoso de las plantas para el ingreso de oxígeno por medio de la rizósfera. Por último, se determinó que la desnitrificación fue casi completa en verano y fue claramente restringida a temperaturas de temporada que se encuentren por debajo de 15 °C (Kuschik et al., 2003).

En el año 2006, la Universidad Nacional Autónoma de México realizó una investigación sobre la remoción de nitrógeno (medido como nitrógeno total, nitrógeno amoniacal y nitratos) en un sistema de humedales artificiales de flujo vertical descendente a escala de banco, con cinco reactores de 250 L de volumen total cada uno, con tiempos de retención hidráulica de 10 días en promedio (0,5 L/h de flujo a cada uno). Dos humedales tenían como sustrato grava y como vegetación emergente presentaban macrófitas (en adelante, el "GM"), los otros dos tenían como sustrato tezontle (escoria volcánica) y como vegetación emergente macrófitas (en adelante, el "TM"). Además, se utilizó un quinto reactor como testigo para evaluar el efecto de las plantas (macrófitas) y que sólo contenía tezontle. Originalmente estos humedales se sembraron dos reactores con carrizos y dos con tules (*Typha latifolia* L.) pero, después de años, predominaron los carrizos en los cuatro reactores (entre 14 a 20 plantas por reactor vs. 1 a 4 plantas de tule). El afluente a tratar fue una solución sintética que estaba compuesta por sacarosa, sulfato de amonio y fosfato monobásico de potasio, con una proporción C:N:P de 6.4:1:0.1 (230 mg de demanda química soluble, DQOs/L). El objetivo de esta investigación fue alcanzar el régimen permanente en los reactores y determinar la eficiencia de remoción de nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal Kjeldahl (NAK) y nitratos (NO₃⁻), utilizando el método del salicilato de sodio.

Durante el periodo de experimentación se alcanzaron condiciones muy cercanas al régimen permanente o estable, ya que, las diferencias entre los datos experimentales obtenidos para la NTK, NAK y NO₃⁻ eran de ± 10. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios porque la eficiencia de remoción del nitrógeno - adicionado al sistema en forma de sulfato de

amoníaco – en forma de nitrógeno amoniacal, estaba en niveles entre 88.7 y 93.3% (91.6% promedio); en forma de nitrógeno total entre 85.1 y 93.1% (90.8% promedio) y, finalmente, como nitratos, el intervalo se encontraba entre 83.2 y 96.5% (92.5% promedio). De la misma forma, se llegó a la conclusión que se obtuvo una mayor remoción para los TM (tezontle + macrófitas) en comparación con los GM (grava + macrófitas) en parámetros de DQO, NTK y NAK, presentándose valores de remoción de 77.5% vs. 70%, 91.5 vs. 89% y 92 vs. 90.5%, respectivamente. A excepción de la remoción de nitratos, en los que se obtuvo una eficiencia mayor para los GM en comparación con los TM de 96.5 vs 88.5% (Rodríguez-Monroy & Durán de Bazúa, 2006).

En el año 2008, en la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias Aplicadas de Viena se realizó un estudio en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR ubicada al este de Viena, denominada Ernstshofen. En dicha PTAR se implementaron (i) un sistema compuesto por dos (02) humedales artificiales (de flujo subsuperficial del tipo vertical) operados en serie (en adelante, el “Sistema 2”) y (ii) un sistema de solo un (01) humedal artificial de flujo subsuperficial del tipo vertical (en adelante, el “Sistema 1”) que operó en el mismo lugar. Ambos fueron alimentados con un afluente pre-tratado en dicha PTAR empleando como vegetación emergente el carrizo. En el Sistema 1 fue construido de acuerdo a los estándares de diseño austriaco, considerando un área de 4 m² por persona equivalente; se utilizó la arena como capa principal del sustrato, con una profundidad de 50 cm y un tamaño granular de 0.06 a 4 mm. La carga orgánica fue de 20 g DQO.m⁻².d⁻¹ y el flujo de ingreso fue intermitente, alimentándolo durante 4 veces por día. Mientras que, el Sistema 2 se diseñó en función al área requerida de 2 m² por persona equivalente, consistiendo en la construcción de dos humedales de flujo subsuperficial de tipo vertical que operaron en serie, recibiendo una carga intermitente y cuya área superficial de cada uno fue de 10 m². Para el primer humedal se utilizó arena como capa principal del sustrato, con una profundidad de 50 cm y un tamaño granular de 2 a 3.2 mm, además presentó una capa de drenaje confiscada; el segundo humedal usó arena como capa principal del sustrato, también con una profundidad de 50 cm y un tamaño granular de 0.06 a 4 mm, además presentó una capa de drenaje convencional.

Este sistema fue alimentado por un flujo cada 3 horas (intermitente) y con una carga orgánica de 40 g DQO.m⁻².d⁻¹ (2 m² por persona equivalente). Los monitoreos, tanto para el Sistema 1, como el Sistema 2 se realizaron en fechas diferentes, desde abril del 2004 a abril del 2005 y desde setiembre del 2005 a abril del 2007, respectivamente. Como resultado, se obtuvo que el Sistema 2 presentó mejores eficiencias en la remoción de parámetros como DBO, DQO, nitrógeno amoniacal y nitrógeno total que el Sistema 1. Específicamente se reportaron eficiencias según el orden de los parámetros mencionados anteriormente: 98.9% y 98.7%; 95.2% y 95.9%; 99.1% y 99.7%; 32.8% y 54.5%, respectivamente para el Sistema 1 y para el Sistema 2. Asimismo, las eficiencias obtenidas fueron mayores que las reportadas por la bibliografía. Por otro lado, los costos de inversión del Sistema 1 fueron mayores en el Sistema 2, en un 75%. En

conclusión, la calidad del efluente tratado por el Sistema 2 fue mejor que la del Sistema 1 (Langergraber, Lerach, Pressi, Rohrhofer & Harberl, 2008).

En el año 2009, se realizó una investigación en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de México con el objetivo de evaluar el tiempo de retención para una depuración óptima de las aguas residuales y la eficiencia de remoción de la carga orgánica, nitrógeno y fósforo mediante la implementación de un sistema de tratamiento por humedales artificiales de flujo horizontal y con dos especies vegetales: carrizo y totora. El sistema fue diseñado con tres módulos construidos de fibra de vidrio con dimensiones de 0.8 m de alto, 0.6 m de ancho y 0.9 m de largo, y pendiente de 1%, los cuales se instalaron de manera secuencial mediante tubos de PVC. En el primero se integraron organismos de la especie carrizo, en el segundo organismos de la especie totora y en el tercero, las dos especies. Cabe resaltar que cada módulo tenía como sustrato una mezcla de grava y arena. Dichos módulos fueron instalados a la salida de un tratamiento primario, alimentados por aguas residuales domésticas provenientes de un edificio de investigación. En el efluente se analizaron los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), nitratos (N-NO_3^-), nitritos (N-NO_2^-) y fósforo total. Luego del monitoreo, se determinó que el tiempo de retención fue de cinco (05) días y se reportó valores de remoción de 95.73% para DQO, 21.87% para fósforo total, 73.85% para $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$, 45.46% para N-NO_3^- y para el caso de N-NO_2^- , el sistema no lo removió sino que la nitrificación condujo a la formación de más nitritos, probablemente porque en algunas zonas del sistema predominan las condiciones anaerobias. En conclusión, los resultados demostraron que el sistema es una buena opción para la remoción de la carga orgánica y de nutrientes, de bajo costo de operación y mantenimiento (Romero-Aguilar, Colín-Cruz, Sánchez-Salinas & Ortiz-Hernández, 2009).

En ese mismo año, en la Universidad Nacional Autónoma de México y en la Universidad Autónoma Metropolitana realizaron una investigación que consistió en implementar un sistema de tratamiento conformado por un humedal artificial de flujo vertical y un filtro de pulimento para remover nutrientes y materia orgánica de un agua contaminada proveniente del Canal de Cuemanco, con la finalidad de obtener agua apta para la preservación de vida acuática silvestre.

El humedal artificial tenía una superficie de 55 m^2 y se alimentaba mediante un flujo vertical intermitente, repartido en cuatro dosificaciones diarias de 1000 L cada una, equivalentes a una carga hidráulica superficial de $72 \text{ mm}^3/\text{mm}^2 \cdot \text{d}$. El filtro de pulimento tenía una superficie de 1.8 m^2 y se instaló con el objeto de promover el proceso de desnitrificación y alcanzar una mayor eliminación de fosfatos (PO_4^{3-}). Durante doce meses de operación, se logró una reducción global de hasta 92% de la demanda química de oxígeno (DQO), 85% de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) y 80% de fosfatos (PO_4^{3-}). Considerándose finalmente la calidad del agua tratada por este sistema como buena para

Por otro lado, en el mismo año en la Universidad Estatal de Washington de EE.UU. se realizó una investigación para evaluar las eficiencias reportadas por diferentes investigadores sobre la implementación de Sistemas Híbridos de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Dichos sistemas consistieron en la instalación en serie de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial tanto del tipo horizontal como vertical, es decir uno precede al otro, formando diferentes combinaciones en serie, con la finalidad de mejorar la remoción de nitrógeno a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación. Cabe señalar que según el análisis realizado por los autores, los Humedales Artificiales de flujo subsuperficial horizontal (FH) promueven los procesos de desnitrificación, mientras que los Humedales Artificiales de flujo subsuperficial vertical (FV) promueven los procesos de nitrificación.

Se analizaron siete (07) casos de estudio, entre los cuales tenemos distribuciones como: i) sistema 1: FV, FV, FH y FH, ii) sistema 2: FV, FV y FH, iii) sistema 3: FV, FH y FH, iv) sistema 4: FV y FH, v) sistema 5: FH y FV, vi) sistema 6: FH y FV y vii) sistema 7: FH, FV y FH. A partir de los cuales, se determinó que la mayor eficiencia se registró en el sistema 7, ya que, fue el sistema más balanceado en términos de nitrificación y desnitrificación porque demostró un alto nivel de nitrificación y satisfactoria remoción de DBO₅, manteniendo bajos niveles de nitrato. Esto se debió, a la adecuada distribución de los humedales artificiales y al mayor aporte de carga orgánica. Asimismo, se determinó que el factor limitante para la remoción del nitrógeno es el carbono en medios aeróbicos (producto de la descomposición de la materia orgánica), lo que significa que la ausencia de carbono puede limitar la nitrificación.

Considerando el análisis realizado, se formuló una propuesta para el diseño de sistemas híbridos de flujo vertical y horizontal cuyo objetivo es alcanzar niveles bajos de N-amoniaco y de nitrógeno total oxidado en los efluentes tratados. En dicha propuesta primero se tendrá que estimar el nivel de transferencia de oxígeno (NTO) para el subsistema de VF con la finalidad de asegurar que existirá suficiente potencial de oxidación (ver ecuación 1).

Cuadro IV-5 Ecuación 1: Cálculo de NTO para el subsistema FV (formulada por Cooper, 1999)

$$NTO = \frac{\text{Caudal} * [DBO_5 \text{ inicial} - DBO_5 \text{ final}] + 4.3 * (NH_4^+ - N_{\text{inicial}} - NH_4^+ + N_{\text{salida}})}{\text{Área total de la superficie}}$$

* El valor recomendado para NTO es de 30 g.m⁻².d⁻¹

Luego, se determinará el área total de la superficie (ATS) del subsistema FV requerida para que se pueda llevar a cabo la nitrificación, estableciendo valores límites de N-amoniaco y DBO₅ para la descarga. Esta área puede ser ajustada para valores esperados de la nitrificación y de la remoción de DBO₅ en el subsistema FH (ver ecuación 2).

Cuadro IV-6 Ecuación 2: Cálculo de ATS del subsistema FV

$$ATS = \frac{\text{Caudal} * [DBO_{\text{inicial}} - DBO_{\text{final}}] + 4.3 * (NH_4^+ - N_{\text{inicial}} - NH_4^+ + N_{\text{final}})}{NTO}$$

Como tercer paso, se calculará el número de subsistemas FV que se requerirán para lograr un tiempo de retención hidráulico (TRH) adecuado mediante el cual se proporcional la remoción de carbono (en términos de DBO₅) con el incremento de la nitrificación (ver ecuación 3).

Cuadro IV-7 Ecuación 3: Cálculo de N° de subsistemas FV requeridos

$$\text{Area superficial individual de FV} = \frac{\text{Caudal}}{\text{TRH}}$$

$$N^{\circ} \text{ de FV} = \frac{\text{ATS de FV}}{\text{Area superficial individual de FV}}$$

Por último, se establecerá la configuración del sistema híbrido, es decir el orden secuencial de los subsistemas FV y FH. En este paso, un pequeño subsistema FH deberá preceder al subsistema FV para remover sólidos suspendidos, ya que, los VF son propensos a obstruirse por sólidos suspendidos. Asimismo, el orden secuencial deberá ser alternado y conectado en serie, donde el último subsistema deberá ser el FH, con el objetivo de promover la desnitrificación y así mejorar la remoción de nitratos (Hoffman et al., 2011).

En el año 2010, la Facultad de Agronomía, Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Zulia y de la Universidad Nacional Experimental “Rafael María Baralt” de Venezuela, desarrolló una investigación para evaluar la remoción de nutrientes y materia orgánica en función del desarrollo de la totora en un humedal artificial superficial, comparado con una fosa control sin presencia de plantas, alimentados con agua residual doméstica proveniente de un sistema de lagunas de estabilización y se determinó el tiempo óptimo de poda. El estudio se realizó en dos periodos definidos por la inflorescencia y posterior poda de la vegetación. Luego del monitoreo realizado, se reportó la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica en el humedal en ambos periodos, con promedios de 30.29 y 30.48% de DQO; 34.63 y 31.63% de DBO; 43.9 y 52.4% de SST y de 42.9 y 60.8% de SSV, en el primero y segundo periodo, respectivamente. Los valores de remoción de nutrientes no presentaron diferencia significativa entre el humedal y el control, alcanzando valores de 45 y 55% para NH₃/NH₄⁺ y de 48 y 50% para NTK respectivamente. La

mayor remoción de fósforo se presentó en el control con 19.17 y 15.35 para cada periodo. Cabe señalar que se hubo correlación entre el crecimiento de la planta y la remoción de nutrientes y de la materia orgánica durante el primer periodo de estudio. En relación al tiempo óptimo de poda, se evidenció que era la octava semana de crecimiento. Entonces, se demuestra el rol importante de totora en el proceso de remoción de materia orgánica, sin embargo, se necesitan más resultados para determinar con precisión la importancia de la macrófita totora en la remoción de nutrientes (Vera et al., 2010).

En ese mismo año, las Universidades de Rio Grande del Sur y Universidad Católica de Pelotas desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue implementar un sistema piloto de humedales artificiales subsuperficiales para remover nitrógeno y fósforo de un efluente pre-tratado que se generaba en la industria metalmeccánica, y de esta manera, se cumpla con los niveles estándares para la descarga de efluentes según norma brasilera.

El sistema consistió en cuatro (04) tanques de poliestireno de 1 m³ cada uno; el cual fue alimentado por un flujo subsuperficial horizontal de caudal 2 m³/d. Este flujo circulaba a través de un sustrato poroso conformado por grava y arena, donde se sembró macrófitas del tipo *Scirpus sp.* (caña) y *Typha sp.* (anea). Se monitorearon parámetros físicos, químicos y biológicos como: pH, T°, NTK, NH₃/NH₄⁺, fósforo total y oxígeno disuelto. De esta manera, a pesar de las variaciones de carga y los problemas operacionales, el sistema fue eficiente para la remoción de contaminantes, así se obtuvieron valores de remoción de 73% de fósforo total, 61% de NTK, 56% de NH₃/NH₄⁺ (Curia, Koppe, Costa, Féris & Gerber, 2011).

También en el mismo año, en la Universidad de Guanajuato en México se llevó a cabo una investigación con el objetivo de determinar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizando la planta acuática emergente conocida como *Arundo donax* L. (caña común muy parecida al carrizo). Para lo cual, se construyeron 12 humedales artificiales con área superficial de 2 m² y profundidad de 40 cm, en los que se plantó caña común en dos tipos de sustrato: (i) tezontle, con diámetro promedio de partícula de 0,5 cm y porosidad de 0,42; y (ii) grava, con diámetro promedio de partícula de 0,5 cm y porosidad de 0,34, y los caudales de afluente a tratar fueron de 0,5, 1,0 y 1,5 m³/d.

Después de los meses de monitoreo, se reportaron valores de remoción de 88% de nitrógeno y 85% de fósforo, por lo que, se concluyó que el uso humedales artificiales con vegetación emergente caña común es una alternativa viable para remover nutrientes de aguas residuales y así evitar la eutrofización de los cuerpos naturales (Francia, Gonzáles, Flores, Espinoza & Sánchez, 2010).

Por otro lado, ese mismo año se desarrolló una investigación en la Universidad de Antioquia en Colombia con la finalidad de evaluar la remoción de materia orgánica en agua residual sintética, en términos de

demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y mediciones *in situ* de pH, oxígeno y temperatura, en seis (06) sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, a escala piloto, sembrados con tres diferentes macrófitas: (i) *Canna limbata* Roscoe ex Ker Gawl. (beri-silvestre), (ii) *Heliconia psittacorum* L. f. (pico de loro) y (iii) *Phragmites* sp (carrizo).

El monitoreo se realizó durante 3 meses, realizando muestreos cada 15 días. Determinándose que las remociones medias de DQO fueron de 97,31 % y 95,94 % para beri-silvestre; 94,49 % y 93,50 % para pico de loro; 97,39 % y 97,13 % para carrizo. En relación a la DBO_5 , se reportaron valores de 100 % y 99,36 % para beri-silvestre; 99,09 % y 97,49 % para pico de loro; 100 % y 99,45 % para el carrizo. Así se llegó a la conclusión que estadísticamente existen diferencias significativas para la remoción de DQO entre las diferentes plantas ($P < 0,05$); en la remoción de la DBO_5 no existen estadísticamente diferencias significativas entre las diferentes plantas ($P < 0,05$). Por tanto, se demuestra la opción de reducir la contaminación por materia orgánica utilizando humedales construidos (Montoya, Ceballos, Casas & Morató, 2010).

Constitución Política del Perú de 1993. Base del sistema jurídico del Perú, cuyo objetivo es controlar, regular y defender los derechos y libertades de los peruanos, así como organizar los poderes e instituciones políticas. El capítulo II del Título III denominado “Del Ambiente y los Recursos Naturales” establece en su art. 66° que los recursos naturales renovables y no renovables son patrimonio de la Nación, y por ende, el Estado es soberano en su aprovechamiento. Asimismo, en los art. 67°, 68° y 69° establece que el Estado se encarga de promover el uso sostenible y la conservación de sus recursos naturales.

Ley N° 28611. Ley General del Ambiente. Su objetivo primordial es ordenar el marco normativo legal para la gestión ambiental y establecer los principios para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente y sus componentes.

Ley N° 29338. Ley de Recursos Hídricos. Esta ley busca modernizar y hacer más eficiente el uso del agua tanto para el sector productivo como para el doméstico. Asimismo, esta ley crea el Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos, cuyo fin es articular el accionar del Estado para guiar los procesos de gestión integrada y de conservación de dichos recursos en los ámbitos de las cuencas, los ecosistemas y los bienes asociados. Bajo este nuevo esquema regulatorio, el uso de los recursos hídricos está condicionado a su disponibilidad. Por ello, en orden prioritario, han establecido tres clases de uso de agua: uso primario (destinado a la satisfacción de necesidades humanas primarias), uso poblacional (captación del agua tratada de una fuente o red pública) y uso productivo (con fines agrario, acuícola y pesquero, energético, industrial, medicinal, minero, recreativo, turístico y de transporte).

Decreto Supremo N° 001-2012-AG. Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos. Este reglamento tiene por objeto regular el uso y gestión de los recursos hídricos que comprenden el agua continental (superficial y subterránea) y los bienes asociados a ella, así como la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, todo ello con arreglo a las disposiciones contenidas en la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338. Se aplica a todas las entidades del sector público nacional, regional y local que ejercen competencias, atribuciones y funciones respecto a la gestión y administración de recursos hídricos continentales superficiales y subterráneos, y a toda persona natural o jurídica de derecho privado que interviene en dicha gestión. También se aplica a las entidades con competencias sobre las aguas marítima y atmosférica, en lo que corresponda.

En el artículo 149° se establece que la ANA es la autoridad que deberá establecer los requisitos y aprobar el procedimiento para el otorgamiento de autorizaciones de reuso de aguas residuales tratadas. Por otro lado, en el art. 150° se establece que las solicitudes de autorización de reuso de aguas residuales tratadas serán evaluadas tomando en cuenta los estándares nacionales o, en su defecto, las guías correspondientes de la Organización Mundial de Salud.

Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Establece los estándares nacionales de calidad ambiental para cuerpos de agua superficial, destinado a cuatro usos: poblacional y recreacional (categoría 1), actividades marino costeras (categoría 2), riego de vegetales y bebidas de animales (categoría 3) y conservación del ambiente acuático (categoría 4). Siendo, los relacionados a esta investigación los estándares de la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (lagunas y lagos) (Cuadro IV-8).

Cuadro IV-8 Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua de la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (lagunas y lagos)

Parámetro	Unidad	Valor
Nitrógeno amoniacal	mg/L	<0.02
Nitratos	mg/ L	5
Nitrógeno total	mg/ L	1.6
Fosfatos total	mg/ L	0.4
pH	Unidad de pH	6.5 – 8.5

Fuente: D.S. N° 002-2008-MINAM.

Directrices sanitarias o valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Regulan el reuso de aguas residuales, excretas y aguas grises tratadas en la agricultura y acuicultura a nivel internacional, principalmente su calidad microbiológica. Los valores guía son referenciales y es una herramienta de manejo preventivo de aguas residuales, excretas y aguas grises en la agricultura y acuicultura para maximizar la seguridad para la salud pública. Con relación a los valores guía de aguas residuales para reuso en la acuicultura se establecen:

Cuadro IV-9 Valores guía de la OMS para el reuso de aguas residuales en la acuicultura

Medio	Huevos de tremátodos (Nº/100 mL)	<i>E.coli</i> (promedio aritmético/100 mL)	Huevos de helmintos (promedio aritmético de huevos/L)
Consumidores de productos			
Agua de estanque	No detectable	$\leq 10^4$	≤ 1
Agua residual	No detectable	$\leq 10^5$	≤ 1
Excretas	No detectable	$\leq 10^6$	≤ 1
Carne de pescado comestible o partes de plantas	Metacercaria infecciosa (presencia o ausencia por pescado y planta) no detectable o no infecciosa	Especificaciones del Código de la Comisión Alimenticia ⁽¹⁾	No detectable
Trabajadores agrícolas y comunidades locales			
Agua de estanque	No detectable ⁽²⁾	$\leq 10^3$	≤ 1
Agua residual	No detectable ⁽²⁾	$\leq 10^4$	≤ 1
Excretas	No detectable ⁽²⁾	$\leq 10^5$	≤ 1

Fuente: OMS, 2006.

Nota:

- (1) El Código de la Comisión Alimenticia no especifica la calidad microbiológica para la carne de pescado o plantas acuáticas, más bien recomienda la adopción de los principios del Análisis de Peligro y Puntos de Control Crítico (APPCC o HACCP, por sus siglas en inglés), tal como se aplica desde la producción hasta el consumo.
- (2) Huevos de esquistosomas cuando sea el caso.

Valores guía de la EPA para el reuso de aguas residuales. Es la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), regulan el reuso de aguas residuales tratadas en siete categorías, de acuerdo con la calidad de agua: urbano, agrícola, recreacional, ambientes naturales, industrial, recarga de acuíferos y reuso potable, a fin de proteger el ambiente de los potenciales impactos negativos. En referencia a los valores guía para el reuso de aguas residuales en ambientes naturales (en humedales, hábitats acuáticos y corrientes de agua) se establecen:

Pais	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L)	Coliformes totales (CT) (UFC/100 mL)	Coliformes termotolerantes (CTo) (UFC/100 mL)	Nitrógeno total (mg/L)	Nitrógeno amoniacal (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
Florida	6.25	6.25	-	200	2	3.75	1.25
Carolina del Norte	10	5	-	14	4	4	1
Washington	20	20	23	-	-	-	1

Fuente: EPA, 2012

5.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Cuadro V-1 Listado de materiales y equipos utilizados

MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD
Tanque ROTOPLAST 250 L	1 un.	1
Tanque ROTOPLAST de 350 L	1 un.	1
Tubo 1/2"	x 5 m.	4
Tubo 3/4"	x 5 m.	3
Válvula de bola PVC con rosca 1/2"	1 un.	2
Válvula de bola PVC con rosca 3/4"	1 un.	2
Pegamento para PVC	1/4 galón	1
Codo 90° PVC 1/2"	1 un.	4
Codo 90° PVC 3/4"	1 un.	1
Tee PVC 1/2"	1 un.	1
Tapón hembra SP 1/2"	1 un.	3
Tapón hembra SP 3/4"	1 un.	1
Geomembrana HPDE 4 mm	1 un.	1
Arena gruesa	m3	2
Confitillo 3/8"	m3	2
Manguera de 3/4"	1 un.	1
Frasco de vidrio	1 un.	4
Equipo	Unidad	Cantidad
Potenciómetro digital marca HANNA HI 98128	1 un.	1
Caja de reactivos conteniendo 50 test para nitrógeno total rango bajo (HANNA)	1 un.	1
Caja de reactivos conteniendo 50 test para fósforo total rango bajo (HANNA)	1 un.	1

5.2.1. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población y muestra para esta investigación es la misma, siendo esta el efluente de la PTAR de la empresa Esmeralda Corp o agua residual del tipo industrial.

5.2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de la investigación es tipo transversal debido a que las variables se estudiaron sólo en un determinado momento, durante diciembre del 2013 hasta agosto del 2014.

Para llevar a cabo esta investigación se desarrollaron cinco (05) etapas:

- Caracterización del agua residual
- Diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS)
- Construcción del HAFSS
- Funcionamiento del HAFSS
- Monitoreo del HAFSS

Estas etapas se describen detalladamente en el ítem 5.2.3.

Como se mencionó anteriormente, esta investigación contó con cinco (05) etapas, las cuales se describirán a continuación:

a. Caracterización inicial del agua residual

Para la caracterización inicial de las aguas residuales tratadas de la empresa Esmeralda Corp S.A.C., primero se revisaron los resultados de análisis realizados en el "Tanque 6" de la PTAR, durante los años 2011 y 2012, relacionados a parámetros físico-químicos tales como sólidos suspendidos totales (SST), sólidos volátiles en suspensión (SSV), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+), nitrato (N-NO_3^-), nitrógeno orgánico (N-orgánico), fósforo total (P-total) y de los parámetros biológicos tales como coliformes termotolerantes (CT) y coliformes totales (CTo). Cabe señalar que en el denominado "Tanque 6", se almacena el efluente final de la PTAR existente.

Además, a fin de tener valores actualizados, en abril del 2012, se monitoreó el "Tanque 6" para evaluar parámetros de campo (pH, T°) y parámetros de laboratorio (SST, SSV, DBO, N-NH_4^+ , N-NO_3^- , N-orgánico, P-total, CT y CTo).

Los parámetros de pH y T° se midieron *in situ* utilizando un equipo marca HANNA HI 98128 con lectura digital, que lleva incorporado termómetro y potenciómetro. En el caso de los análisis de parámetros físico-químicos citados anteriormente, se recolectaron muestras en frascos de plástico y se agregó el preservante correspondiente según el análisis a realizar (Cuadro V-2 y Cuadro V-3), luego se trasladó en un cooler al laboratorio Envirolab Perú S.A.C., donde se realizaron los respectivos análisis

De los resultados de dicha caracterización, las concentraciones más elevadas fueron de los parámetros N-NH_4^+ y P-total, siendo sus valores de 248.3 mg/L y 19.77 mg/L respectivamente (Cuadro V-2 y Anexo 2).

Estos parámetros se compararon con los valores establecidos en el ECA-agua, para la Categoría IV (destinado a la conservación del ambiente acuático, lagunas y lagos), a fin de encontrar al parámetro que excede en mayor porcentaje al estándar, y que se deberá remover en el humedal. De dicha comparación, se determinó que el N-NH_4^+ (N-amoniaco)⁽¹⁾ excede en mayor porcentaje al estándar en 12415%, frente al 22% del P-total.

Considerando los porcentajes de exceso mencionados y que el diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales se realiza en función a un parámetro crítico, es decir, en función al parámetro cuya concentración se encuentre más elevada o presente mayor porcentaje de exceso respecto a los estándares que se pretenden cumplir, se optó por el diseño en función al N-amoniaco (parámetro crítico) para el presente caso.

⁽¹⁾ Según la Categoría 4 del ECA-agua (conservación del ambiente acuático), el estándar de N-amoniaco es <0.02 mg/L.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ECA-agua (Cat. 4 / Lagunas y Lagos)	MÉTODO / EQUIPO DE MEDICIÓN
pH	7.50	6.50 - 8.50	Potenciómetro digital marca HANNA HI 98128
T°	25.5 °C	-	Potenciómetro digital marca HANNA HI 98128
Sólidos suspendidos totales (SST)	8 mg/L	≤ 25 mg/L	Método Estándar 2540-D APHA, AWWA, WEF 21° Ed, 2005 Sólidos suspendidos totales secados a 103 – 105°C
Sólidos volátiles en suspensión (SVS)	5 mg/L	-	Método Estándar 2540-E APHA, AWWA, WEF 21° Ed, 2005 Sólidos fijos y volátiles totales a 550°C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	26 mg/L	< 5 mg/L	Método EPA 405.1 600/4-79-020 Revisado Marzo, 1983 Demanda bioquímica del oxígeno (5 días, 20°C)
Nitrógeno amoniacal (N-amoniacal) (N-NH ₄ ⁺)	248.3 mg/L	< 0.02 mg/L	Método Estándar 4500-NH3-F APHA, AWWA, WEF 21° Ed, 2005 Método del Fenato
Nitratos (N-nitrato) (N-NO ₃ ⁻)	0.23 mg/L	5 mg/L	Método EPA 352.1 600/4-79-020 Revisado Marzo, 1983 Nitrógeno, Nitrato (Colorimétrico Brucina)
Nitrógeno orgánico (N-orgánico)	9.07 mg/L	-	Método Estándar 4500-NH3-C APHA, AWWA, WEF 21° Ed 2005 "Método Volumétrico"
Fósforo total (P-total)	19.77 mg/L	0.4 mg/L	Método Estándar 4500 P E APHA, AWWA, WEF, 21° Ed, 2006
Coliformes Termotolerantes (CT)	13 mg/L	1000 mg/L	Método Estándar 9221 E.1 APHA, AWWA, WEF, 21° Ed, 2006 Técnica de fermentación en Tubo Múltiple para miembros del grupo coliforme fecales: E. Coli. Método Estándar 9221 B

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ECA-agua (Cat. 4 / Lagunas y Lagos)	MÉTODO / EQUIPO DE MEDICIÓN
Coliformes totales (CTo)	79 mg/L	2000 mg/L	APHA, AWWA, WEF, 21° Ed, 2006 Técnica de fermentación en Tubo Múltiple para miembros del grupo coliformes

Cuadro V-3 Tipos de recipientes y preservantes relacionados a cada tipo de análisis

PARÁMETRO	RECIPIENTE / EQUIPO	PRESERVANTE
pH	Peachímetro digital marca HANNA HI 98128 (<i>In situ</i>)	-
T°	Peachímetro digital marca HANNA HI 98128 (<i>In situ</i>)	-
SST	01 Frasco de plástico de 1L	Refrigeración
SSV	01 Frasco de plástico de 1L	Refrigeración
DBO	01 Frasco de plástico de 1L	Refrigeración
N-amoniacoal (N-NH ₄ ⁺)	01 Frasco de plástico de ½ L	H ₂ SO ₄
N-nitrato (N-NO ₃ ⁻)		
N-orgánico	01 Frasco de plástico 1L	H ₂ SO ₄
P-total	01 Frasco de plástico de ½ L	HNO ₃
CT	01 Frasco de plástico de 100 mL colilert	Refrigeración
CTo	01 Frasco de plástico de 100 mL colilert	Refrigeración

b. Diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS)

El HAFSS se diseñó utilizando los datos obtenidos de en la caracterización realizada al efluente de la PTAR, que se almacena en el Tanque 6. Según dichos resultados, el parámetro que excede del estándar en mayor porcentaje fue el N-amoniacoal – porcentaje de 12415% – (Cuadro V-2 y Anexo 2), y considerando que el diseño de un sistema de tratamiento de



Las aguas residuales se realiza en función a un parámetro crítico, es decir, en función al parámetro cuya concentración se encuentre más elevada o presente mayor porcentaje de exceso respecto a los estándares que se pretende cumplir, se optó por el diseño en función al N-amoniaco (parámetro crítico) para el presente caso.

Por otro lado, se asumió un caudal de tratamiento de 170 L/d, por ser un proyecto a escala piloto.

El dimensionamiento del HAFSS se realizó según lo detallado a continuación:

- a. Se calcula la constante de nitrificación a 20°C (d^{-1}) en función a la profundidad de raíces.

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922 (rz)^{2.6077}$$

(Ec. 1)

Donde:

rz = Porcentaje del lecho del humedal FSS ocupado por la zona de raíces, como fracción decimal (0 a 1).

- b. Se asume el valor para el N-amoniaco residual (C_e) y se resuelve las ecuaciones Ec. 2 y 3 para obtener el área requerida para nitrificar, determinándose así TRH para el sistema.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t)$$

(Ec. 2)

$$A_s = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K_T n y}$$

(Ec. 3)

Donde:

- A_s : Área superficial del humedal (m^2)
 - C_e : Concentración de N-amoniaco en el efluente (mg/L)
 - C_o : Concentración de N-amoniaco en el afluente (mg/L)
 - K_T : Constante dependiente de la temperatura (d^{-1})
 $K_T = K_{NH} (1.048)^{(T-20)}$
 - y = profundidad del agua (m)
 - n : Porosidad del humedal (%)
 - t : tiempo de retención hidráulica (d)
- c. Tomar ($C_o - C_e$) como el nitrato producido por la nitrificación y usar este valor como el afluente de la ecuación Ec. 4. Determinar la concentración de nitratos en el efluente con la ecuación Ec. 4.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t)$$

(Ec. 4)

- d. La concentración de nitrógeno total (NT) en el efluente es la suma de los valores de C_e obtenidos en las ecuaciones Ec. 2 y Ec. 4 Si no se alcanzó la exigencia de NT se necesita otra iteración de los cálculos.



- **Condiciones y parámetros:**

Parámetro	Valor asumido
Temperatura (°C)	15.7
C _{afluente N-amoniaco} (C _{oN}) (mg/L)	248.3
C _{efluente N-amoniaco} (C _{eN}) (mg/L)	80
Caudal (Q) (m ³ /d)	0.17
Vegetación a sembrar	Totora (<i>Typha domingensis</i> Pers.)
Profundidad de raíces (m)	0.5
Profundidad de material de relleno (sustrato) (m)	0.6
Profundidad de nivel de agua (m)	0.5
Profundidad de humedal (m)	0.8
Porosidad material de relleno (sustrato) (%)	38
Sustrato o material de relleno (sustrato)	Confitillo 3/8"
	Arena gruesa
Pendiente (%)	1
Talud (°)	45

- **Cálculo de K_{NH}:**

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922 (rz)^{2.6077} \dots\dots(1)$$

$$rz = 0.5/0.6 = 0.83 \dots\dots(2)$$

(2) en (1):

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922 (0.83)^{2.6077}$$

$$K_{NH} = 0.2599 \text{ d}^{-1}$$

- **Cálculo de K_T:**

$$K_T = K_{NH} (1.048)^{(T-20)}$$

$$K_T = 0.2599 (1.048)^{(15.7-20)}$$

$$K_T = 0.2124 \text{ d}^{-1}$$

- **Cálculo de tiempo de retención (t_r):**

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp (-K_T t)$$

$$\frac{80}{248.3} = e^{-0.2124 \cdot t_r}$$

$$t_r = 5.33 = 6 \text{ d}$$

$$As = \frac{Q \ln(Co/Ce)}{K_T \cdot y \cdot n}$$

y = prof. del agua

n = porosidad del material del relleno (sustrato)

$$As = \frac{0.17 \times \ln(234/80)}{0.2124 \times 0.5 \times 0.3} = 2.66 \text{ m}^2 =$$

$$As = 3 \text{ m}^2$$

Considerando relación L:W de 3:1



$$As_{nueva} = 3 \text{ m}^2$$

• **Volumen del humedal**

$$V = As \times h$$

$$V = 3 \text{ m}^2 \times 0.8 \text{ m}$$

$$V = 2.4 \text{ m}^3$$

• **Cálculo de la concentración de nitrato (Ce_N) en efluente tratado:**

Cálculo de K_T (T° = 15.7 °C)

$$K_T = 1(1.15)^{(15.7-20)}$$

$$K_T = 0.5490 \text{ d}^{-1}$$

Cálculo de Ce_N

$$Co_N = 234 - 80 = 154 \text{ mg/L}$$

$$\frac{Ce}{Co} = \exp(-K_T t)$$

$$\frac{Ce_N}{154} = e^{-0.5490 \times 6}$$

$$Ce_N = 5.71 \text{ mg/L}$$

En resumen, del modelo de diseño adoptado, se obtuvieron los parámetros detallados en el siguiente cuadro, los que se utilizaron para la construcción del HAFSS:

Cuadro V-4 Parámetros de diseño del HAFSS

Parámetro	Condición
Área superficial	3 m ²
Largo	3 m
Ancho	1 m
Profundidad del humedal artificial	0.8 m
L:A	3:1
Profundidad del agua	0.5 m
Material granular o sustrato	Arena gruesa Confitillo 3/8"
Porosidad del sustrato	38 %
Espesor del sustrato	0.6 m
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6 d
Vegetación	Totora (<i>Typha domingensis</i> Pers.)
Densidad de siembra	3.3 planta/m ²

c. Construcción del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS)

La construcción del HAFSS se realizó durante cuatro meses, de agosto a noviembre del 2013, en función a los parámetros de diseño señalados previamente. El largo fue de 3 m, el ancho de 1 m y 0.8 m de profundidad total. Se ubicó cerca del "Tanque 6", porque desde ahí se alimentaba el afluente a tratar en el HAFSS.

Primero, se realizó la excavación de la zanja, la cual se recubrió con una geomembrana de HDPE⁽²⁾ de 4", cuyas dimensiones fueron de 6 m x 3 m aproximadamente. Después, se implementó el sistema de recolección, conformado por un tanque de almacenamiento final y una tubería de recolección del efluente tratado por el HAFSS. Como tanque de almacenamiento final se instaló un tanque ROTOPLAST de capacidad de 250 L, el cual se ubicó en la parte posterior al área del humedal. La tubería de recolección fue de material de PVC de ¾" de diámetro y se le hicieron agujeros de aproximadamente 2 cm de diámetro distanciados cada 20 cm en función del largo, a fin de recolectar el efluente tratado. Esta tubería se instaló en el fondo y a lo largo del HAFSS, y se conectó directamente con el tanque de almacenamiento, mediante una unión en "T" de PVC.

A continuación, se procedió a rellenar la zanja con el sustrato, el cual estuvo conformado por dos lechos de diferente material. Se comenzó a rellenar con una capa de confitillo de 3/8" cuya profundidad fue de 0.3 m (segundo lecho), luego se colocó una capa de arena gruesa de profundidad de 0.3 m (primer lecho).

⁽²⁾ HDPE: Polietileno de alta densidad

Por último, se implementó el sistema de distribución conformado por un tanque de almacenamiento inicial y tres (03) tuberías de distribución. Se instaló un tanque ROTOPLAST como tanque de almacenamiento inicial de capacidad de 250 L, el cual se ubicó en la parte superior del área del humedal, desde el cual se alimentaba frecuentemente el afluente a tratar proveniente del “Tanque 6”. Las tuberías de distribución fueron tres (03) tubos de PVC de ½” de diámetro con agujeros de 0.5 cm de diámetro distanciados cada 20 cm en función al largo, a través de dichos agujeros se distribuyó uniformemente el afluente a tratar. Estas tuberías se instalaron paralelas entre sí, encima del primer lecho y se cubrieron con una capa de piedra chancada de ½” de 5 cm de altura, sobre esta superficie se sembró la vegetación emergente.

La especie empleada como vegetación emergente fue la *Typha domingensis Pers.*, conocida comúnmente como totora. Para su identificación, se consideró en primer lugar, que era una especie nativa y de fácil acceso en la zona de amortiguamiento del Refugio de Vida Silvestre “Pantanos de Villa”, donde se ubica la PTAR – lugar de desarrollo de esta investigación –, y en segundo lugar, debido a su alta capacidad para remover nutrientes y metales pesados en humedales artificiales, según la revisión bibliográfica consultada.

La totora fue trasplantada desde una zona de totorales muy cercana al “Tanque 6”⁽³⁾ de la PTAR, a través de plantones de 40 cm de altura de la parte aérea y 10 cm de raíces. Se sembraron 10 plantones distribuidos equitativamente cada 60 cm sobre la superficie del humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) de área 3 m², haciendo una densidad de siembra de 3.3 planta/m². Dichos plantones fueron sembrados en la última capa de piedra chancada de ½” del HAFSS, como se mencionó líneas arriba, que tenía una altura de 5 cm, a fin de que sus raíces queden protegidas. Por otro lado, a fin de proteger el HAFSS del ingreso de animales como perros que podrían dañar la vegetación sembrada, se instaló una malla de seguridad alrededor del HAFSS, de modo que aisle el humedal e impida el ingreso de animales y personas ajenas a la investigación (Anexo 6).

Es importante señalar que, el tanque de almacenamiento inicial era alimentado con el efluente proveniente del “Tanque 6”, a un caudal de 170 L/d. Asimismo, antes de desviar el caudal a tratar en el HAFSS, se evaluó el afluente con el fin de conocer su calidad inicial antes de iniciar el tratamiento (Anexo 3), y así poder comparar los resultados obtenidos de dicha evaluación con la calidad del efluente tratado, de modo que se pueda evaluar la eficiencia del tratamiento.

Los parámetros físico-químicos analizados fueron: pH, T°, turbidez, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal (N-amoniacal), nitratos (NO₃⁻), fósforo total (P-total), ortofosfatos (PO₄³⁻) y anhídrido fosfórico (P₂O₅).

³ El afluente que se trató en el Humedal Artificial de Flujo Subssuperficial (HAFSS) provenía del “Tanque 6”, donde se almacena el efluente final la PTAR.



Anexo 9.

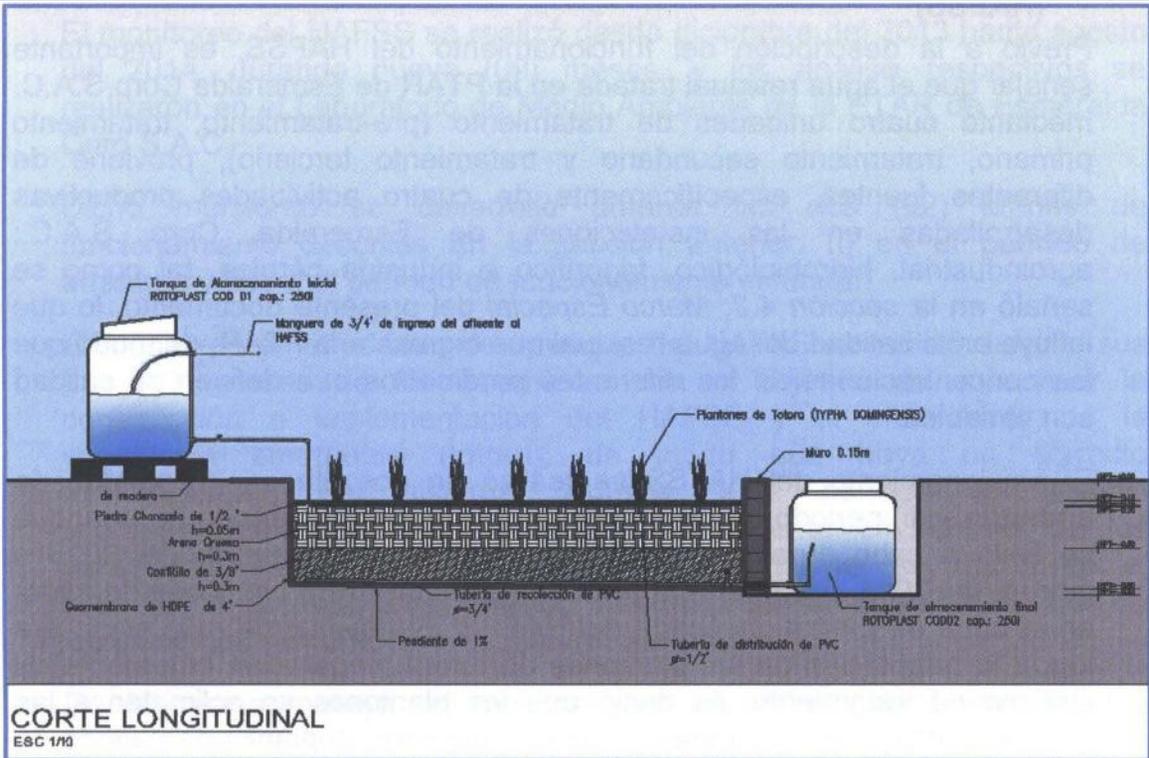
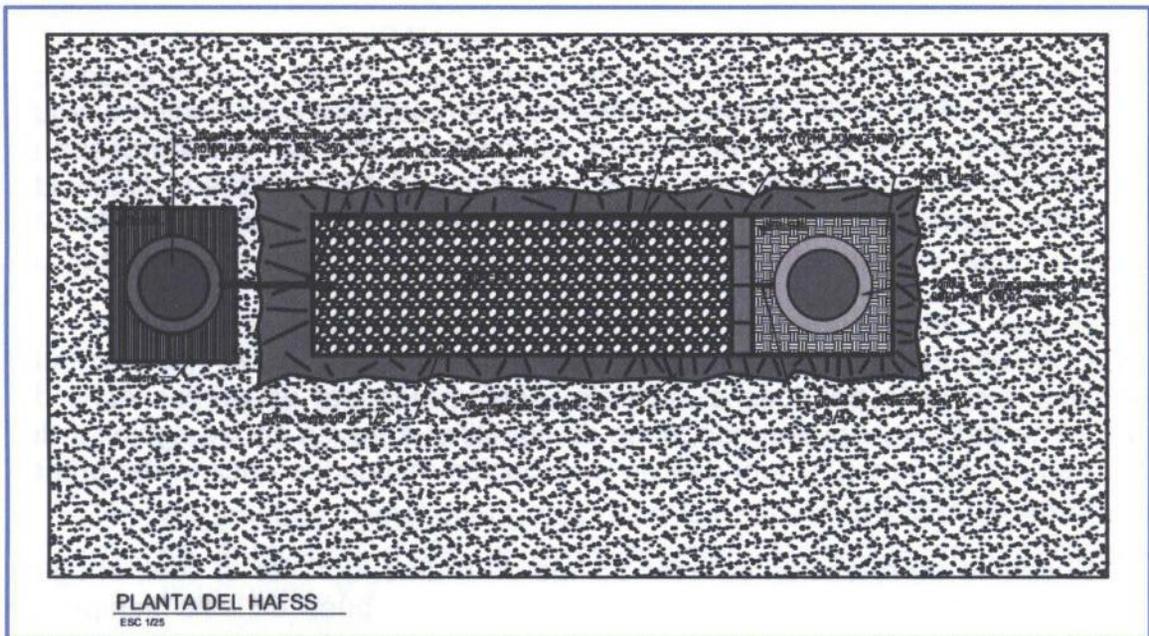


Figura V-2 Vista de planta del HAFSS



d. Funcionamiento del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS)

Previo a la descripción del funcionamiento del HAFSS, es importante señalar que el agua residual tratada en la PTAR de Esmeralda Corp S.A.C. mediante cuatro unidades de tratamiento (pre-tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario), proviene de diferentes fuentes, específicamente de cuatro actividades productivas desarrolladas en las instalaciones de Esmeralda Corp S.A.C.: agroindustrial, hidrobiológico, frigorífico e industria cárnica, tal como se señaló en la *sección 4.2: Marco Especial* del presente documento, lo que influye en la calidad del agua residual que ingresa a la PTAR, de modo que las concentraciones de los diferentes parámetros que definen su calidad son variables.

El funcionamiento del HAFSS se realizó en dos etapas: (i) periodo de arranque y (ii) periodo de funcionamiento estándar. El periodo de arranque se llevó a cabo durante tres (03) meses, desde diciembre del 2013 a febrero del 2014, posterior a la siembra de los diez (10) plantones de totora en la capa de piedra chancada del HAFSS. El objetivo de esta etapa era lograr la adaptación de los plantones de totora (vegetación emergente) al sistema de tratamiento, es decir, que los plantones se aclimaten a las nuevas condiciones brindadas. La etapa posterior, denominada periodo de funcionamiento estándar, se desarrolló durante seis (06) meses, desde marzo hasta agosto del 2014. En esta etapa se dio el funcionamiento normal del HAFSS, es decir, se inició el tratamiento del afluente a través del HAFSS, luego de la correcta adaptación de las totoras al sistema.

En ambas etapas, el funcionamiento del HAFSS se realizó como se describe a continuación. El efluente tratado en la PTAR es almacenado en el "Tanque 6", desde donde se conectó una manguera para derivar el agua a tratar en el HAFSS, denominada afluente. El afluente que ingresaba al HAFSS era almacenado en un tanque ROTOPLAST, para ser distribuido uniformemente mediante una válvula de bola de PVC a un caudal de 170 L/d, esta válvula era controlada diariamente en forma manual por un operario.

El afluente que ingresaba por la válvula y la conexión en "L", se distribuía uniformemente por todo el sustrato (conformado por un primer lecho de arena gruesa y un segundo lecho de confitillo) a través de los agujeros del sistema de tres (03) tuberías de distribución instalados encima del primer lecho del HAFSS.

El tiempo de retención del HAFSS fue de 6 días, durante el cual, el agua permaneció en el sistema para ser tratada. Después de este tiempo, el agua tratada o efluente era recolectada a través de los agujeros de la tubería de recolección instalada en el fondo del HAFSS, descargándose posteriormente en el tanque de almacenamiento a través de una unión "T". En el tanque de almacenamiento, era tomada la muestra del efluente tratado para ser analizado en el Laboratorio de Medio Ambiente de la PTAR, cada 6 días (Anexo 7).

El monitoreo del HAFSS se realizó desde diciembre del 2013 hasta agosto del 2014, durando nueve (09) meses, y los análisis respectivos se realizaron en el Laboratorio de Medio Ambiente de la PTAR de Esmeralda Corp S.A.C.

Dicho monitoreo se desarrolló durante las dos (02) etapas de funcionamiento descritas en la sección anterior: (i) en el período de arranque y (ii) en el período de funcionamiento estándar.

El monitoreo en el período de arranque del HAFSS se realizó durante sus tres (03) meses de funcionamiento con el objetivo de supervisar la construcción e implementación del HAFSS y el crecimiento de la vegetación emergente (totoras), de modo que haya un correcto funcionamiento del sistema. Durante este período se analizó semanalmente la calidad del afluente y efluente en función de los parámetros físicos: pH, turbiedad y T°. Asimismo, se monitoreó el crecimiento de las totoras, llevando un control del tamaño de cada uno de los plantones sembrados y los nuevos que brotaban.

De la misma manera, el monitoreo en el período de funcionamiento estándar se realizó durante sus seis (06) meses de operación, a fin de determinar la eficiencia del HAFSS y controlar la calidad del efluente tratado. Así, se realizaron muestreos de frecuencia semanal del afluente y efluente para analizar parámetros físico-químicos, detallados posteriormente.

Los parámetros físico-químicos evaluados se describen a continuación:

- **Parámetros principales:** Se define así a los parámetros relacionados directamente con el objetivo de la investigación, tales como: nitrógeno total (N_t), nitrógeno amoniacal ($N-NH_4^+$), nitratos ($N-NO_3^-$), fósforo total (P-total), ortofosfatos (PO_4^{3-}) y anhídrido fosfórico (P_2O_5).

Para lo cual, se utilizó un fotómetro multiparamétrico modelo HI 83224 de la marca HANNA, una caja de reactivos con 50 test para nitrógeno total rango bajo de la marca HANNA y otra caja de reactivos con 50 test para fósforo total de la marca HANNA.

- **Parámetros complementarios:** Son los parámetros adicionales, que se analizaron a fin de complementar al análisis de parámetros principales, y así obtener una visión integral del funcionamiento del HAFSS. Estos son: temperatura (T°), pH y turbiedad.

Para lo cual, se utilizó un peachímetro digital HI 98128 de la marca HANNA con medidor de temperatura incorporado y un turbidímetro 2100N de la marca HACH.

En el Anexo 4 se presentan los valores obtenidos de los diferentes parámetros evaluados durante todo el periodo de monitoreo realizado al HAFSS. Y en el Anexo 5 se presentan los resultados de laboratorio de los parámetros principales, realizados en el último monitoreo al HAFSS.

6.1. PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS

6.1.1. pH

Como se puede observar en el Gráfico VI-1, los valores de pH registrados en el afluente y efluente presentan un comportamiento irregular. Sin embargo, se registran mayores valores en el afluente, sobre todo en los últimos tres meses.

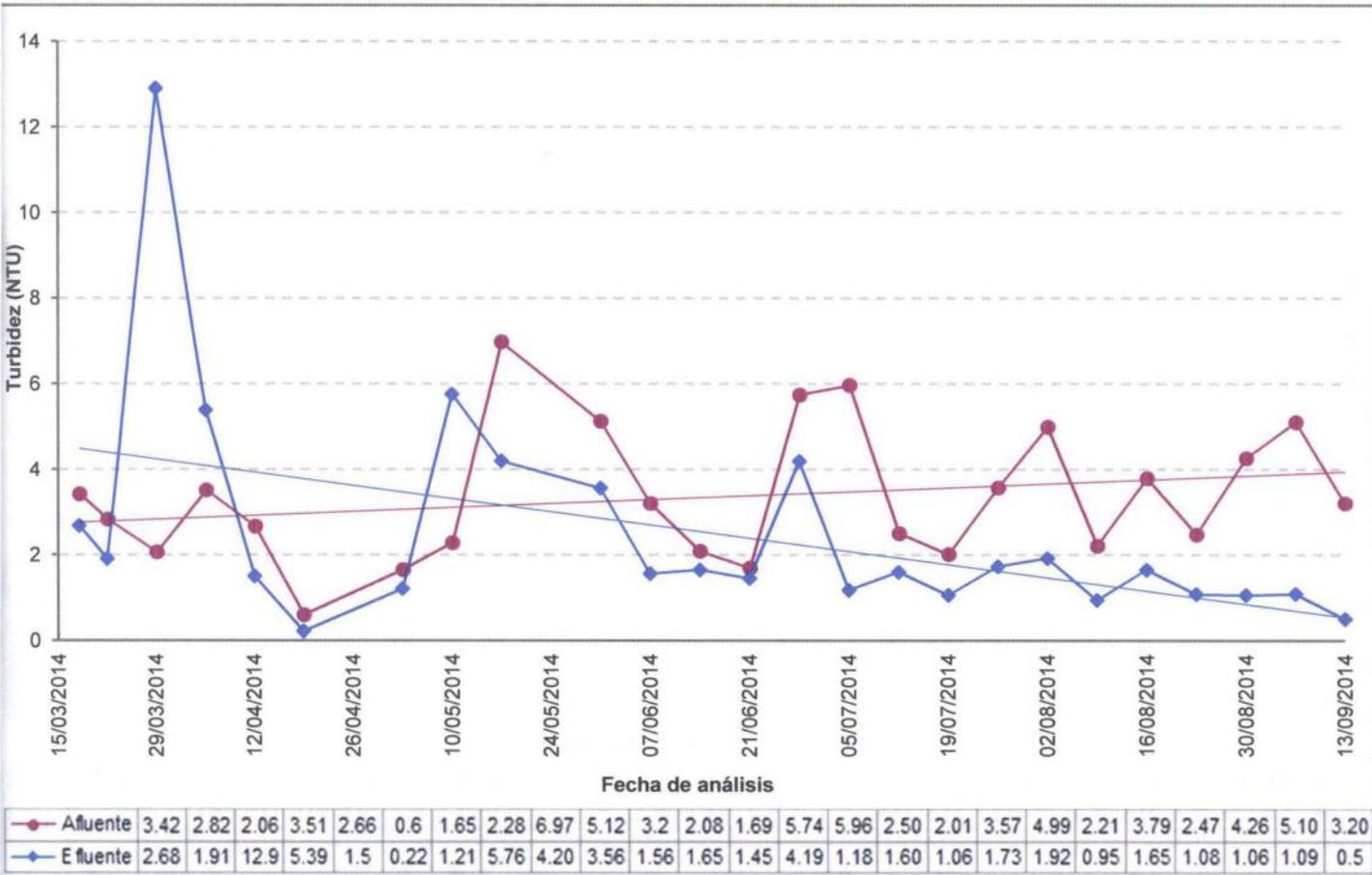
Gráfico VI-1 Variación de niveles de pH registrados





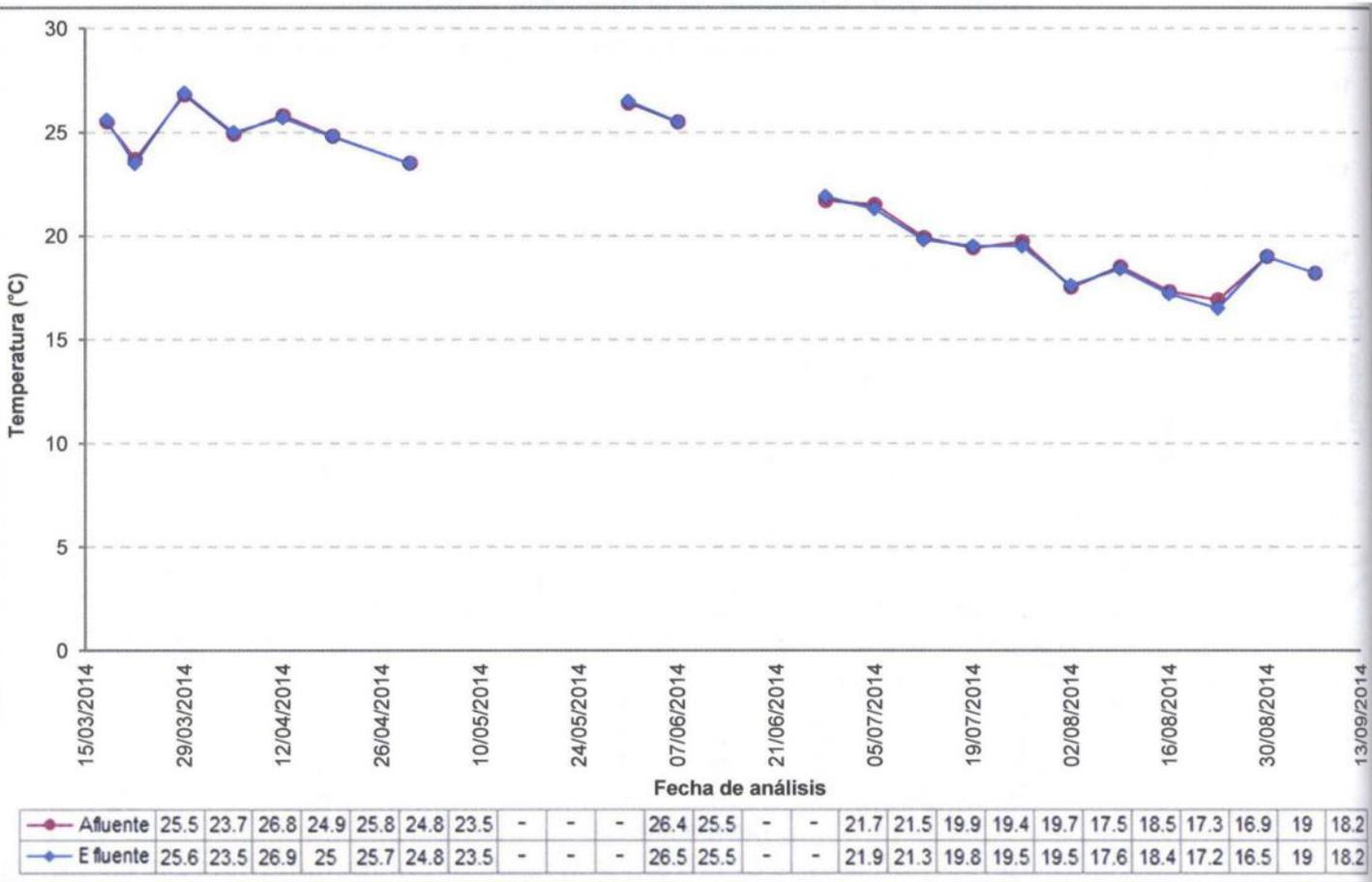
Como se puede observar en el Gráfico VI-2, los valores de turbiedad registrados en el afluente y efluente presentan un comportamiento irregular. Sin embargo, se registran mayores valores en el afluente, sobre todo en los últimos cuatro meses.

Gráfico VI-2 Variación de la turbiedad registrada



Como se puede observar en el Gráfico VI-3, los valores registrados de temperatura del afluente y el efluente son similares y presentan un comportamiento irregular.

Gráfico VI-3 Variación de la temperatura registrada

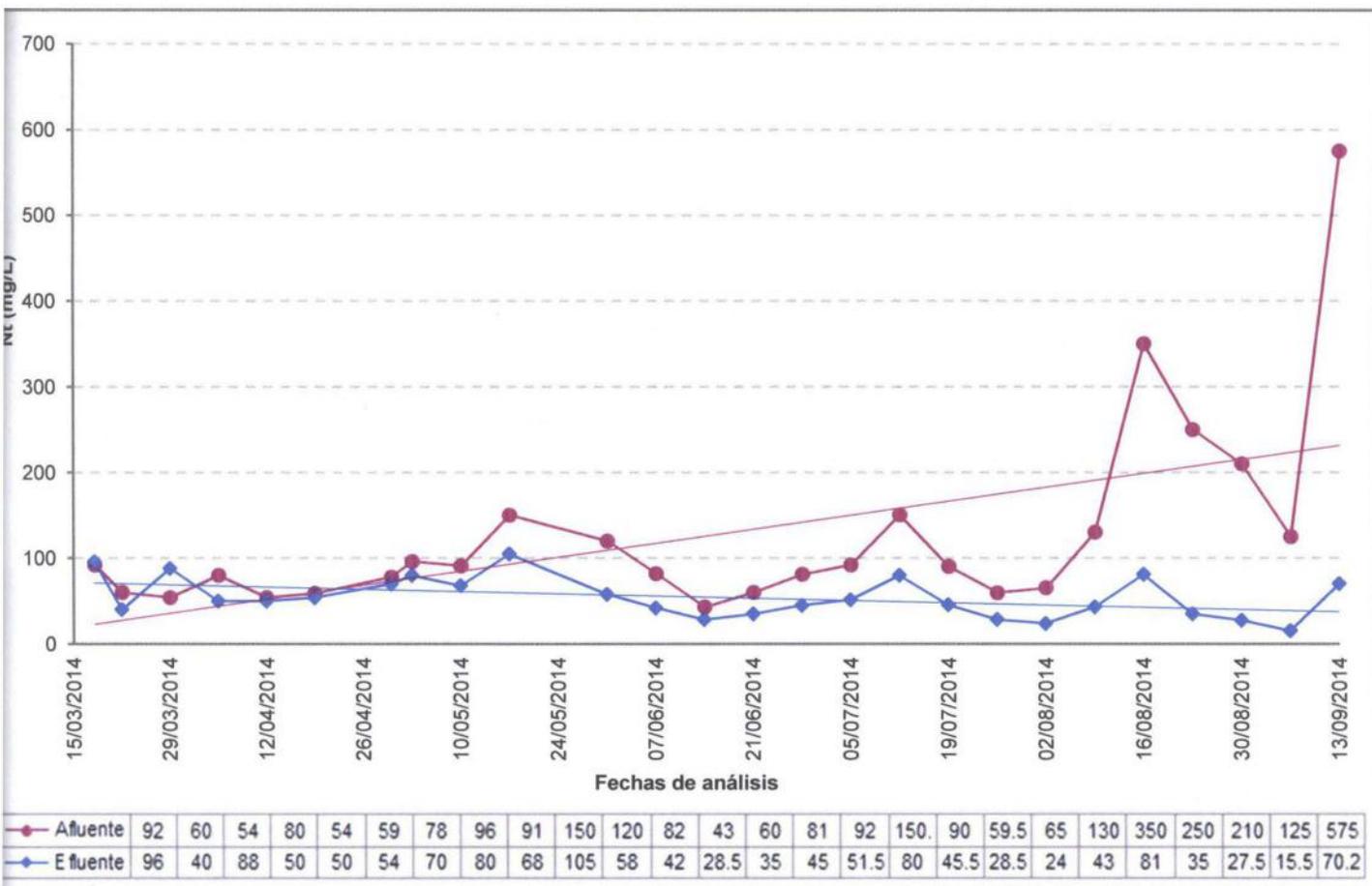


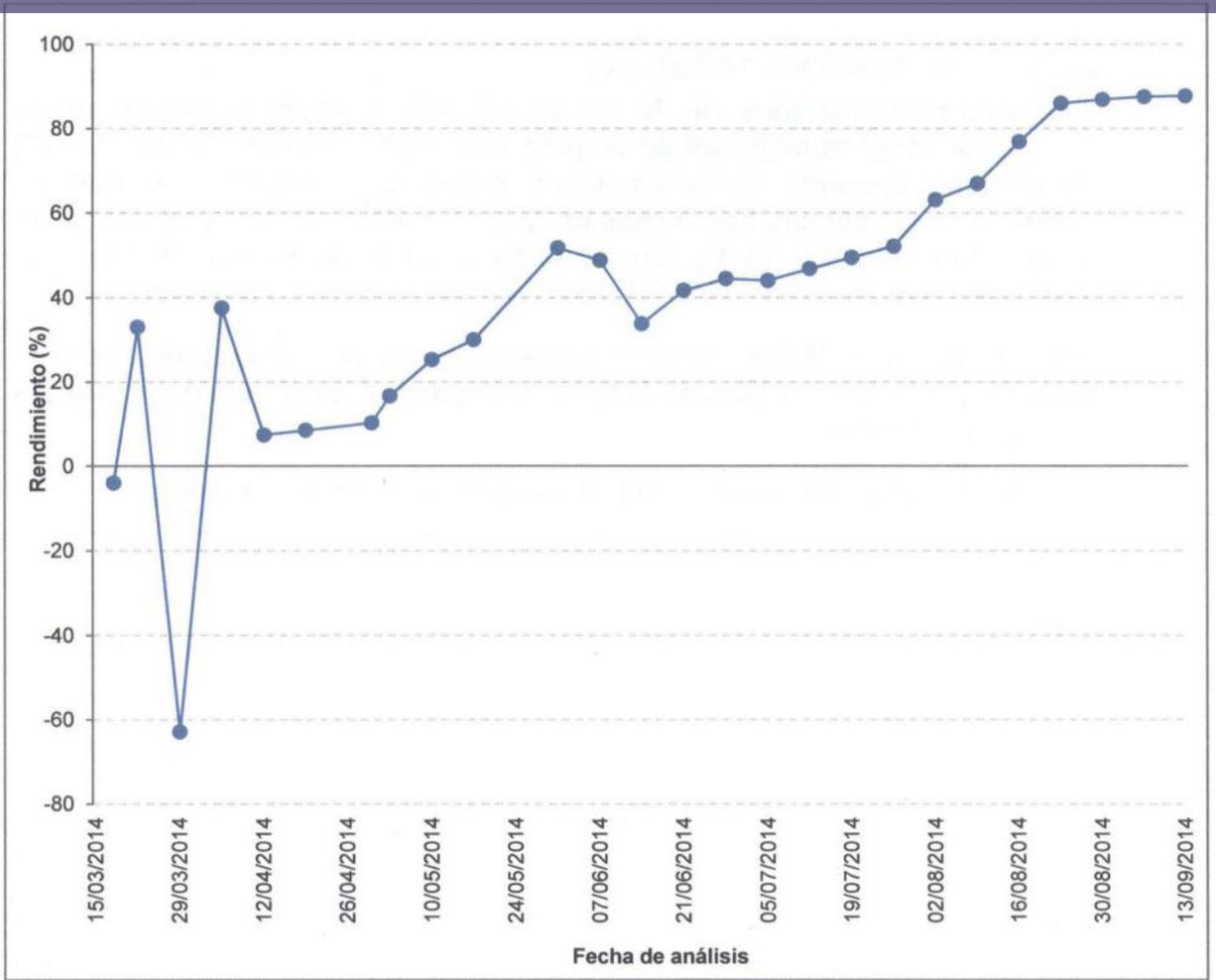
6.2.1. NITRÓGENO TOTAL (N_t)

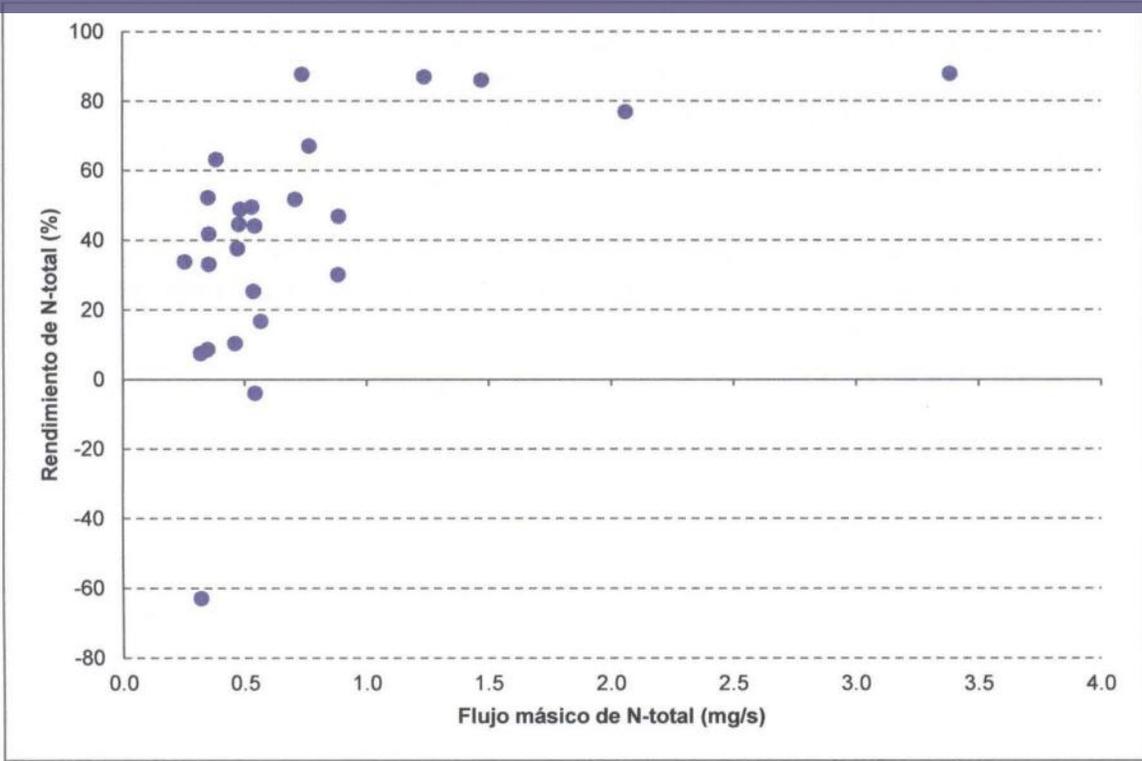
Los valores registrados de N_t en el afluente y efluente presentan un comportamiento regular, donde durante casi toda la operación del HAFSS el afluente presenta concentraciones mayores al efluente, lo que se refuerza en los últimos tres meses porque se puede apreciar una diferencia mayor (ver Gráfico VI-4). En el Gráfico VI-5 se puede observar el rendimiento obtenido del HAFSS durante el periodo de tratamiento.

Finalmente, en el Gráfico VI-6 se presenta el comportamiento descrito por los valores de flujo másico de N-total en función al rendimiento del HAFSS para este parámetro.

Gráfico VI-4 Variación de las concentraciones de N_t registradas





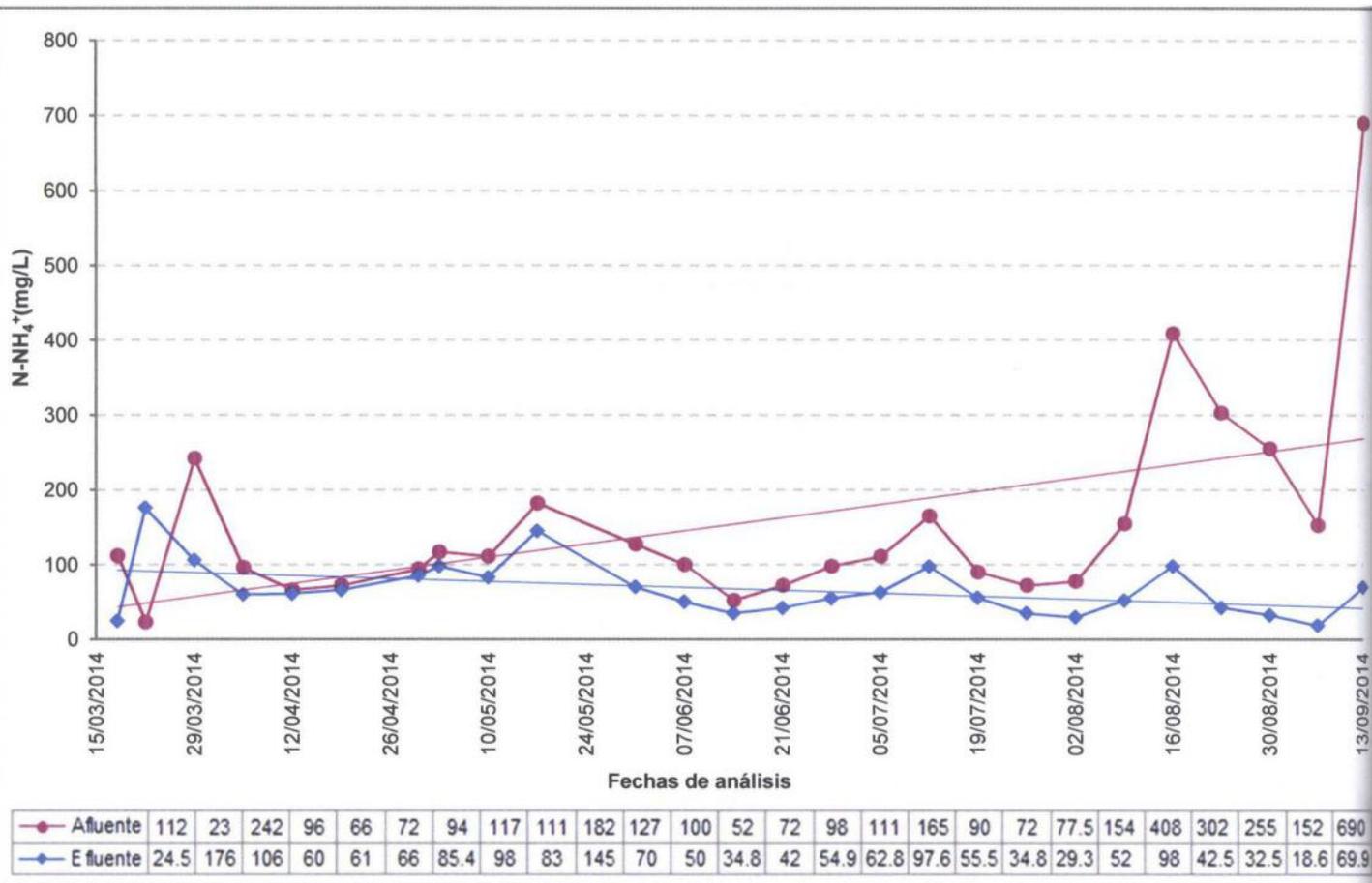


6.2.2. NITRÓGENO AMONIAICAL (N-NH₄⁺)

Los valores registrados de N-NH₄⁺ en el afluente y efluente presentan un comportamiento regular, donde durante casi toda la operación del HAFSS el afluente presenta concentraciones mayores al efluente, lo que se aprecia más en los últimos dos meses porque se puede existir una diferencia mayor (ver Gráfico VI-7). En el Gráfico VI-8 se puede observar el rendimiento obtenido del HAFSS durante el periodo de tratamiento.

Finalmente, en el Gráfico VI-9 se presenta el comportamiento descrito por los valores de flujo másico de N-amoniaco en función al rendimiento del HAFSS para este parámetro.

Gráfico VI-7 Variación de las concentraciones de N-NH₄⁺ registradas



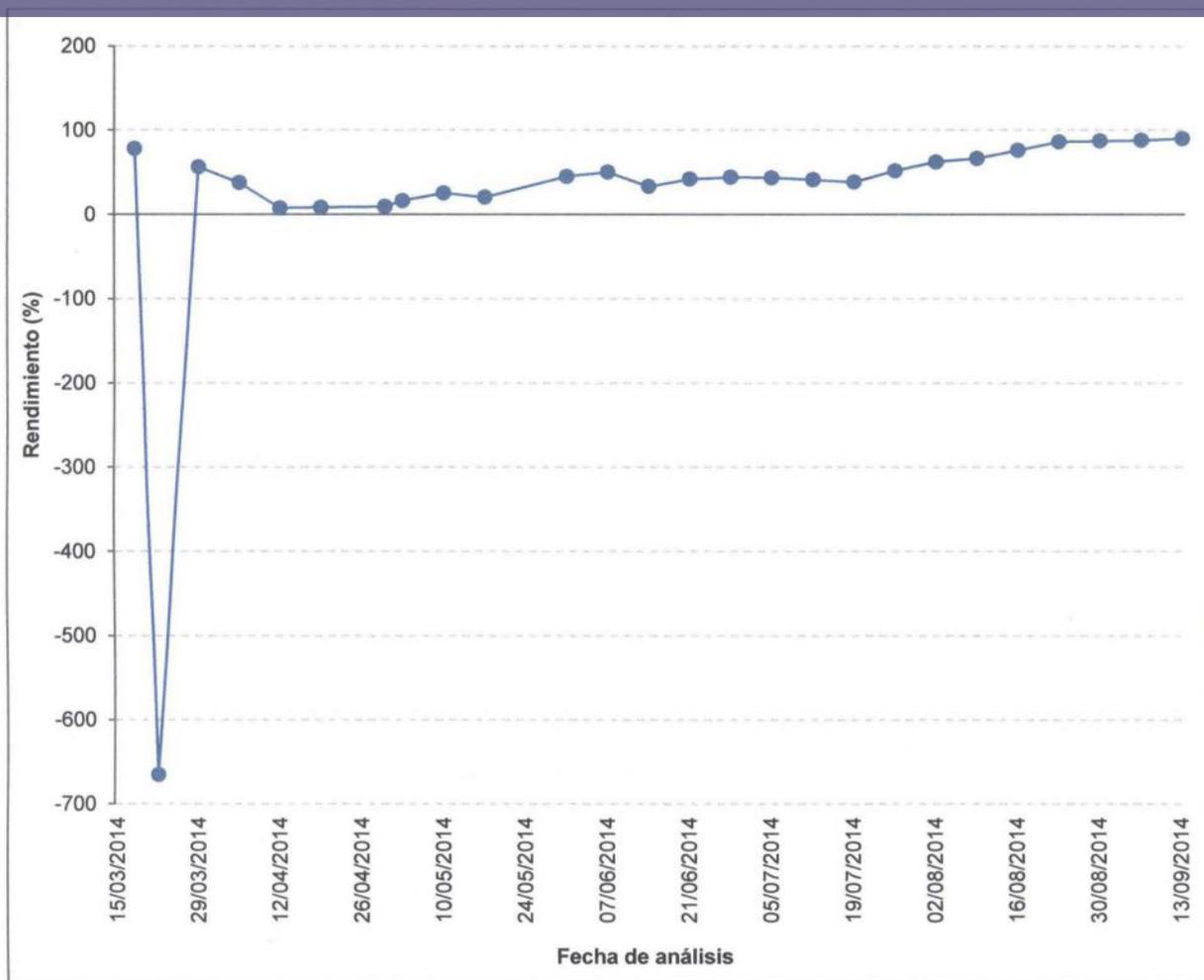
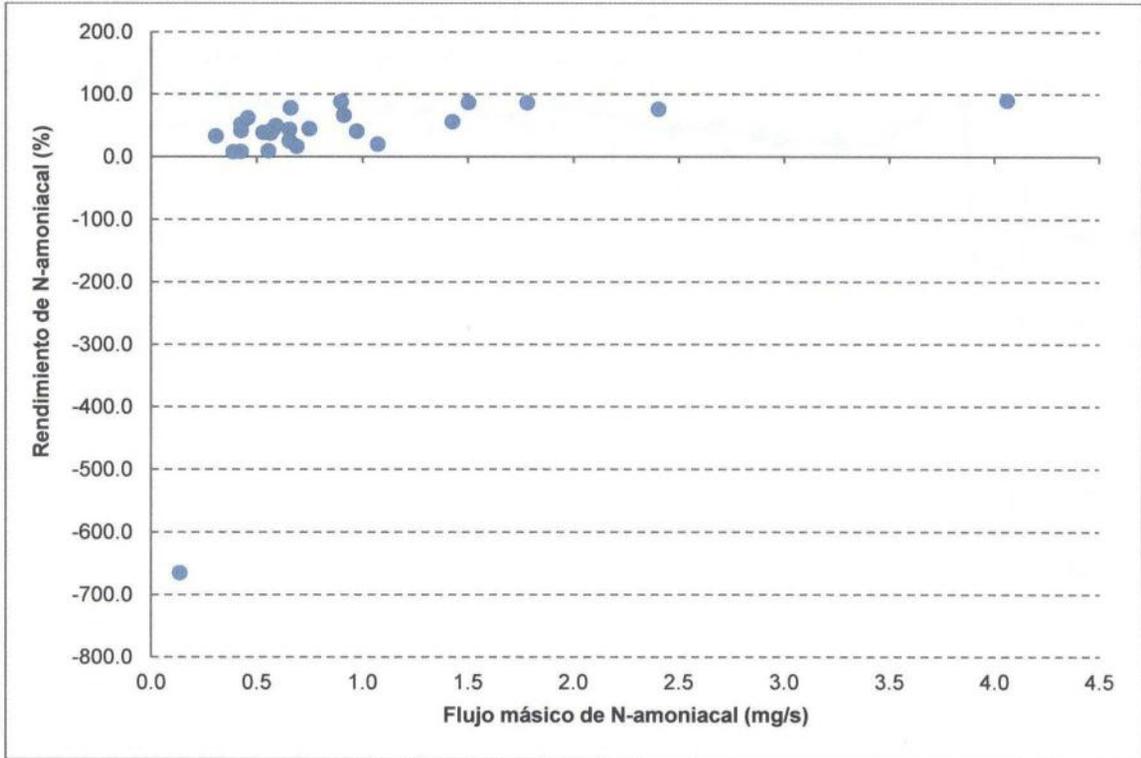


Gráfico VI-9 Rendimiento del N-amoniaco vs. Flujo másico de N-amoniaco



Las concentraciones de N-NO₃⁻ en el afluente y el efluente presentan un comportamiento irregular, donde generalmente los valores del afluente son mayores al efluente, lo que se acentúa en los últimos tres meses (ver Gráfico VI-10). En el Gráfico VI-11 se presenta el rendimiento del HAFSS en términos de N-NO₃⁻ obtenido durante el periodo de tratamiento.

Finalmente, en el Gráfico VI-12 se presenta el comportamiento descrito por los valores de flujo másico de nitratos en función al rendimiento del HAFSS para este parámetro.

Gráfico VI-10 Variación de las concentraciones de N- NO₃⁻ registradas

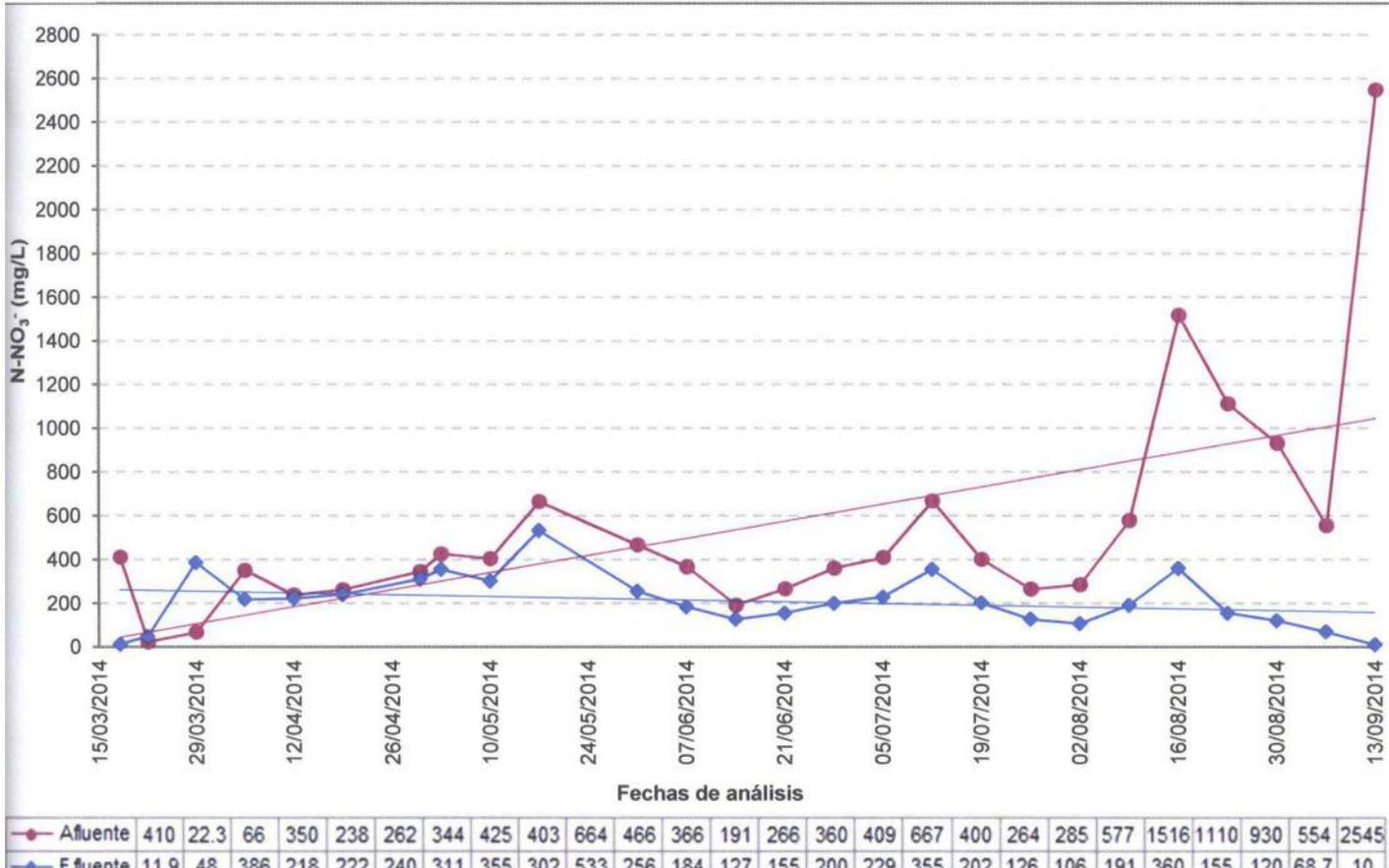
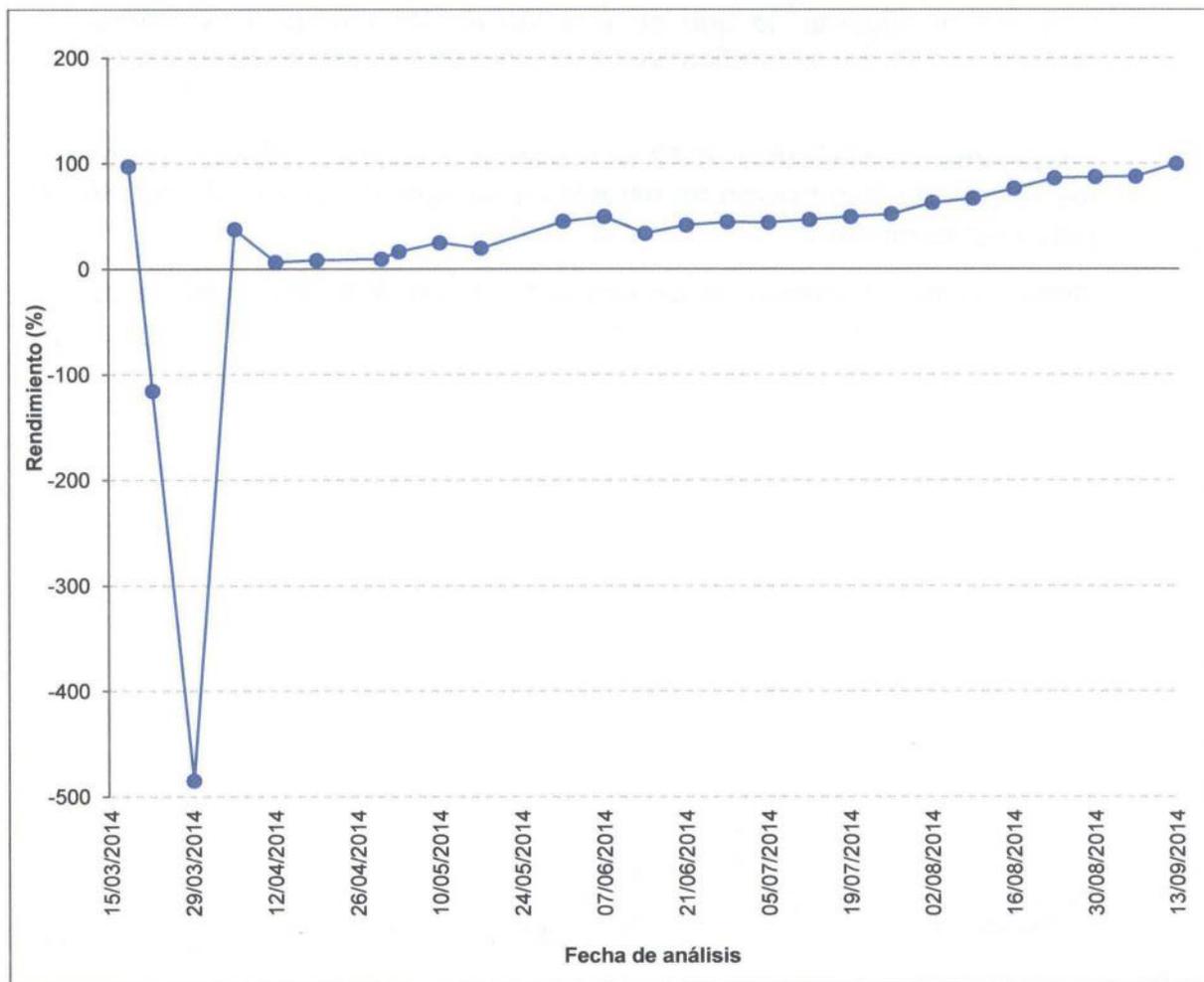
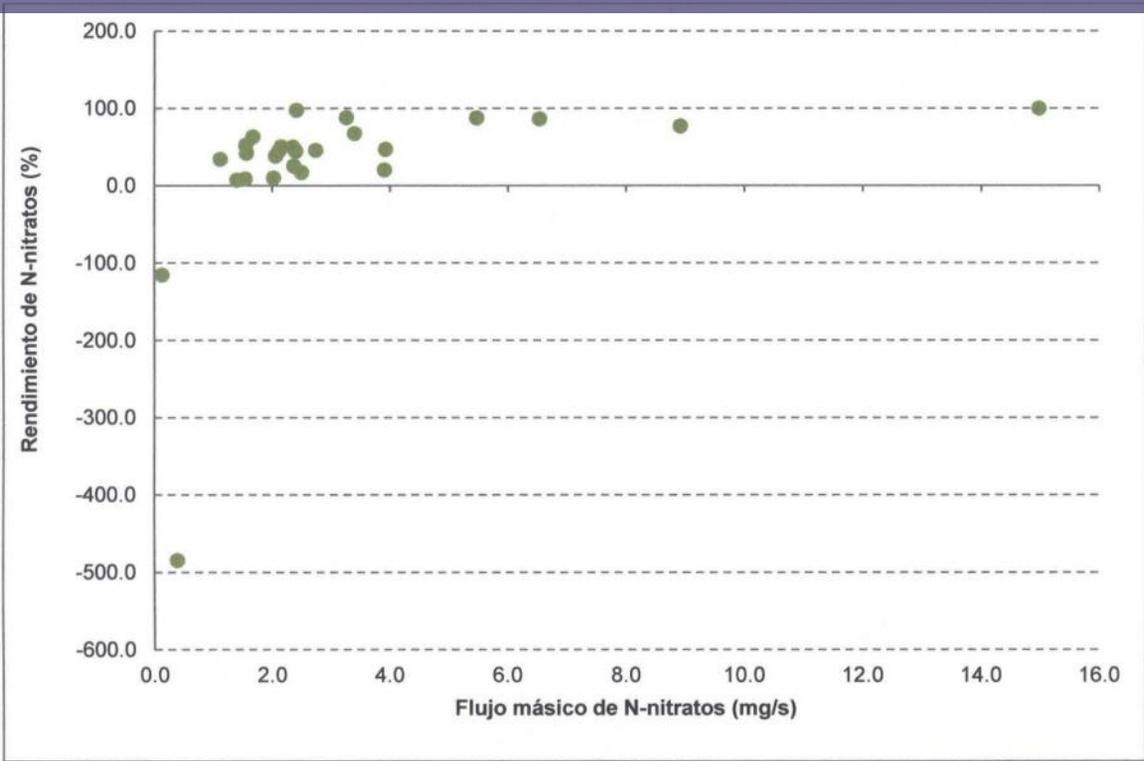


Gráfico VI-11 Rendimiento del HAFSS en términos de N-NO₃⁻





Los valores de Pt registrados en el afluente y efluente describen un comportamiento irregular como se puede observar en el Gráfico VI-13, donde la mayoría de concentraciones del afluente son mayores a las del efluente. En el Gráfico VI-14 se presenta el rendimiento obtenido en el HAFSS en función del Pt.

Gráfico VI-13 Variación de las concentraciones de Pt registradas

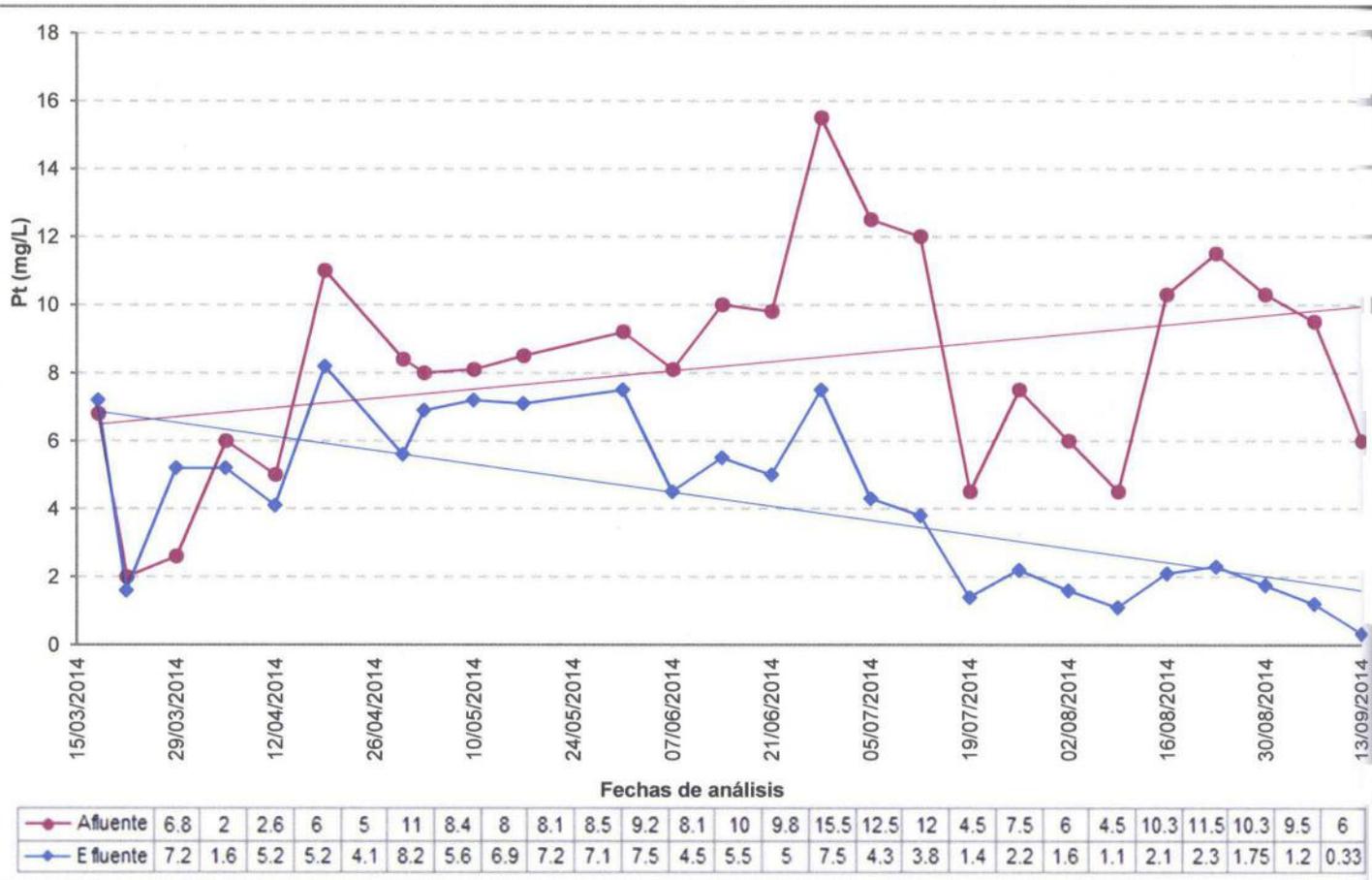
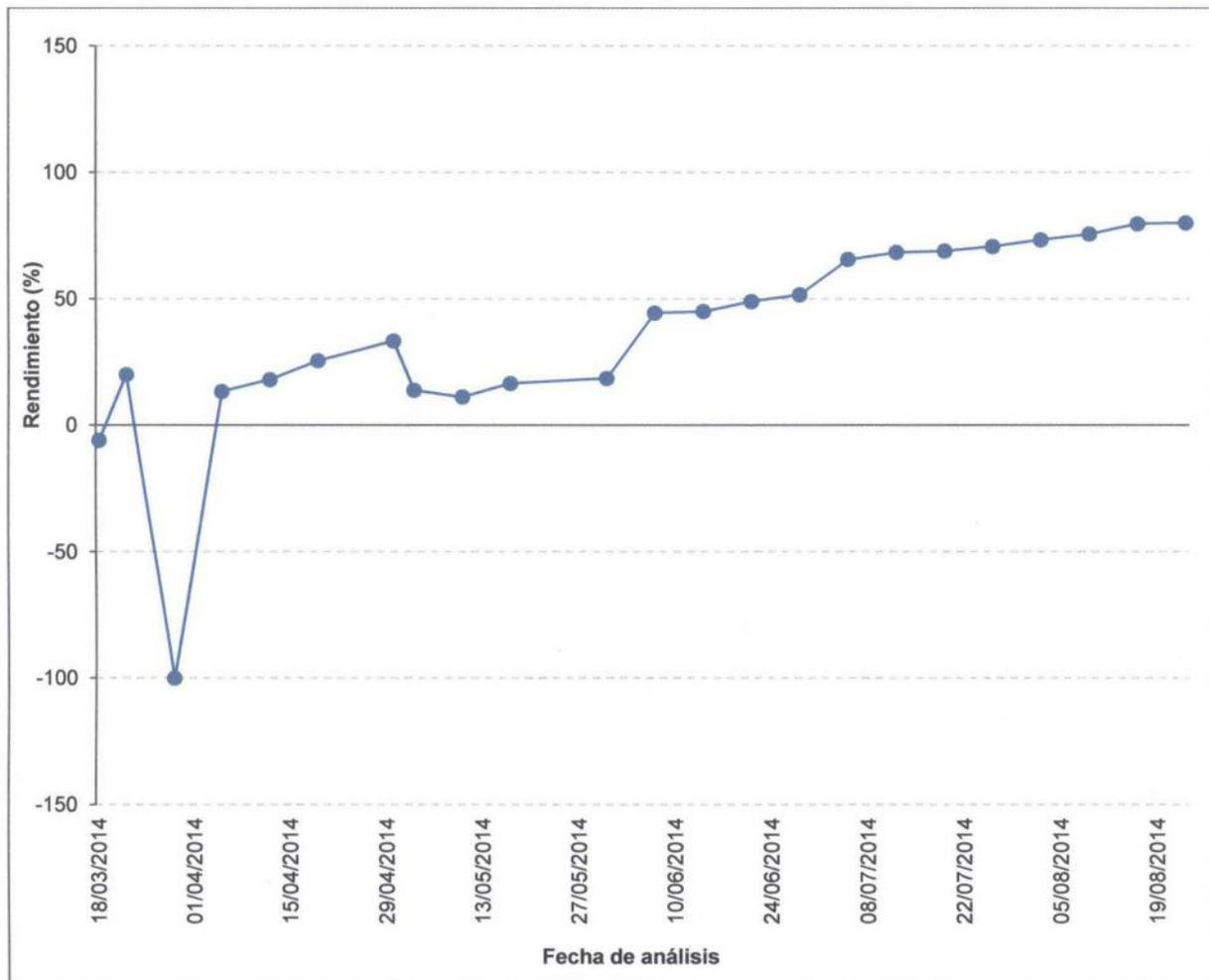


Gráfico VI-14 Rendimiento del HAFSS en términos de Pt



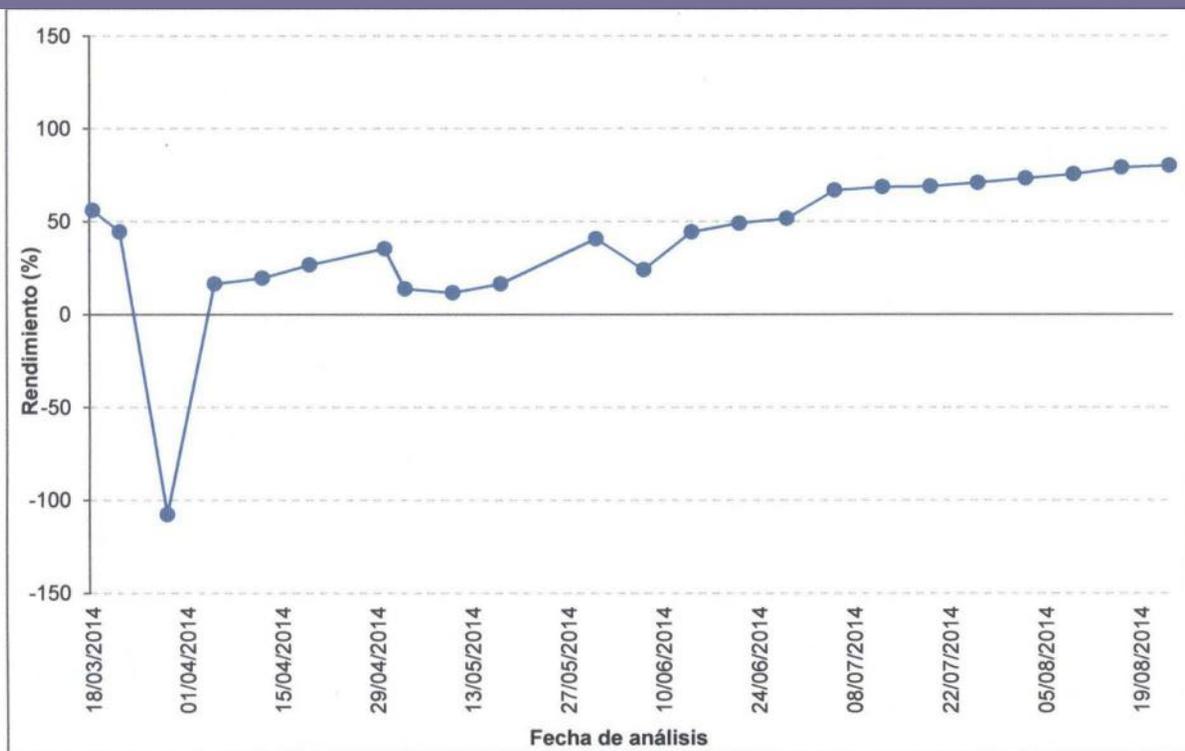
6.2.5. **ORTOFOSFATOS (PO_4^{3-})**

Las concentraciones de PO_4^{3-} en el afluente y el efluente presentan un comportamiento irregular, generalmente los valores del afluente son mayores al efluente, lo que se acentúa en los últimos cuatro meses (ver Gráfico VI-15). En el Gráfico VI-16 se presenta el rendimiento del HAFSS en términos de PO_4^{3-} obtenido durante el periodo de tratamiento.

Gráfico VI-15 Variación de las concentraciones de PO_4^{3-} registradas



Gráfico VI-16 Rendimiento del HAFSS en términos de PO₄



Los valores de P₂O₅ registrados en el afluente y efluente describen un comportamiento irregular como se puede observar en el Gráfico VI-17, donde la mayoría de concentraciones del afluente son mayores a las del efluente. En el Gráfico VI-18 se presenta el rendimiento obtenido en el HAFSS en función del P₂O₅.

Gráfico VI-17 Variación de las concentraciones de P₂O₅ registradas

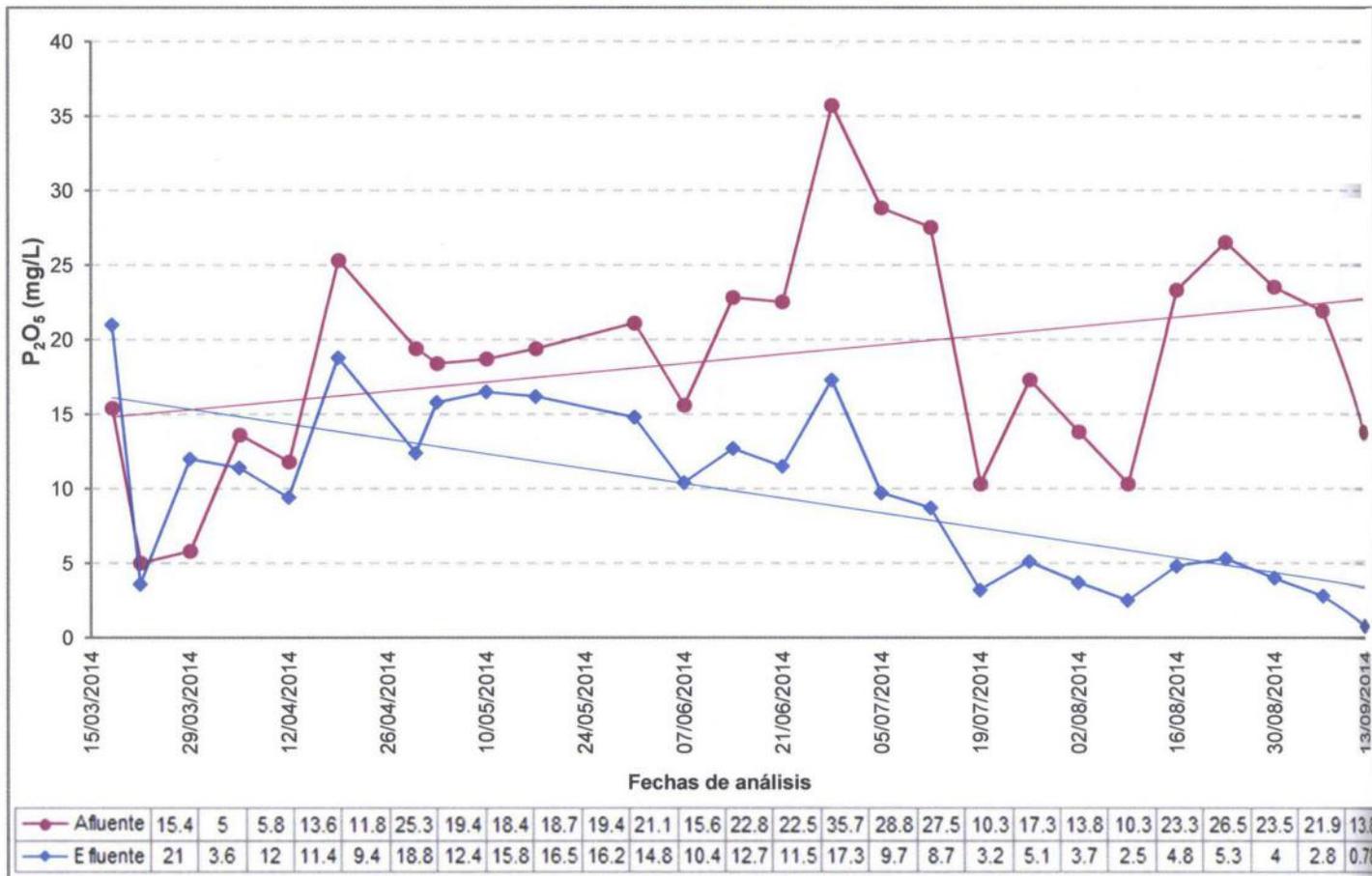
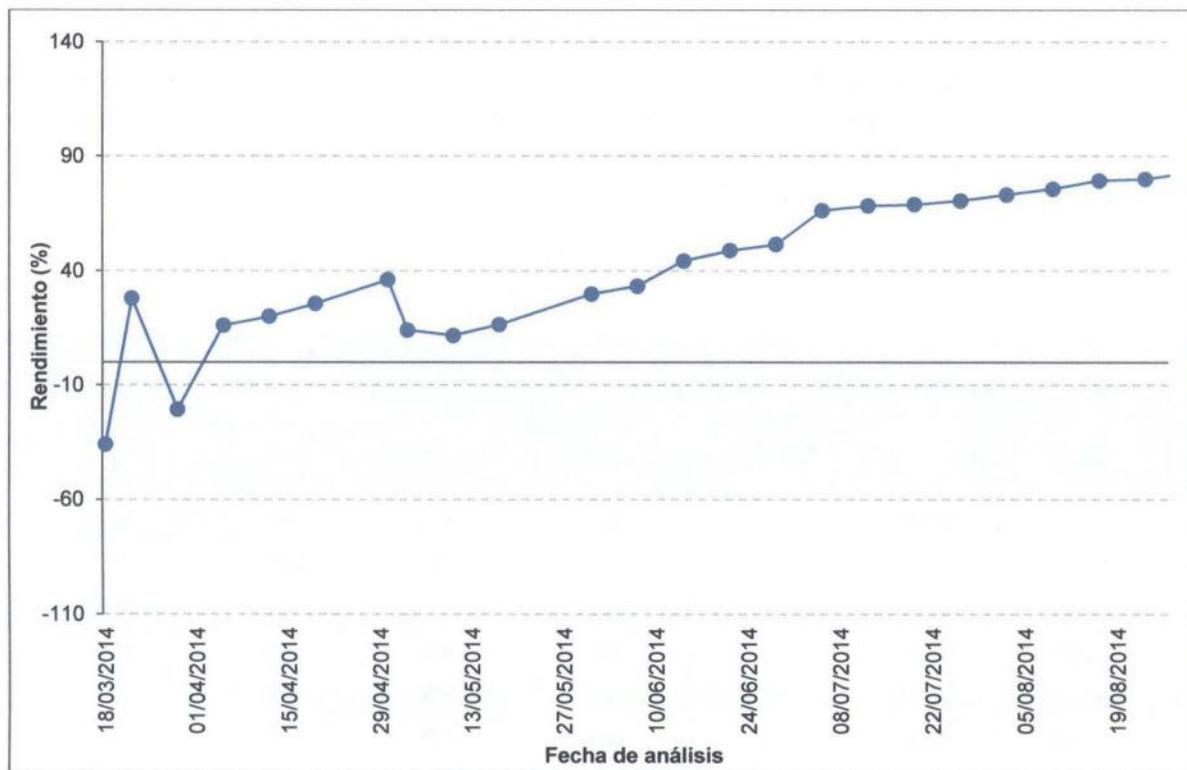


Gráfico VI-18 Rendimiento del HAFSS en términos de P₂O₅



6.3. EVOLUCIÓN DE LA TOTORA EN FUNCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL HAFSS

Durante el período de arranque y los tres primeros meses de funcionamiento del HAFSS (marzo hasta mayo) se llevó un registro de las alturas alcanzadas por los plantones de totora y de su densidad (Cuadro VI-1). Esos datos se compararon con los rendimientos registrados para cada parámetro principal evaluado (Cuadro VI-1 y Anexo 8)

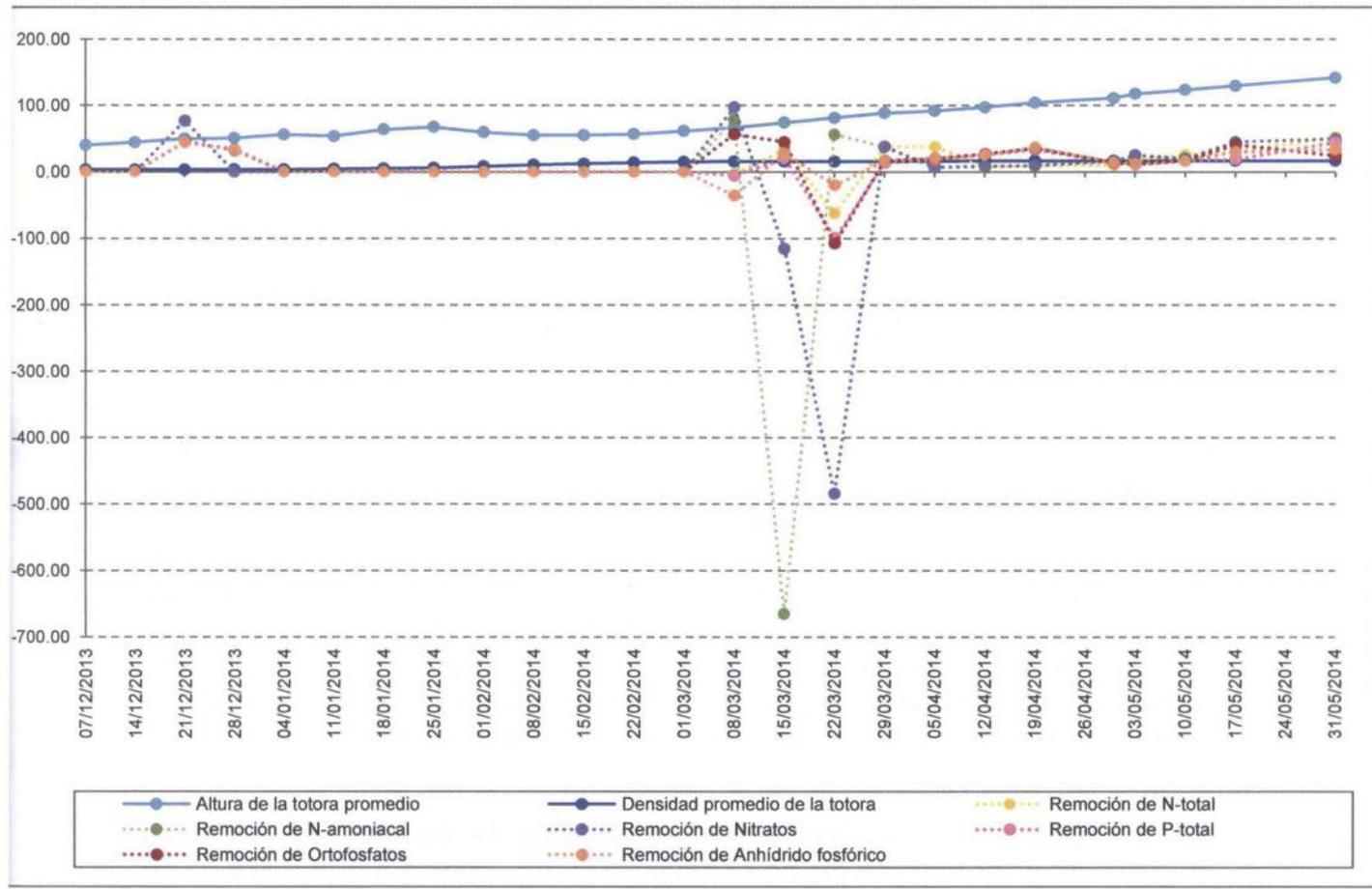
Cuadro VI-1 Cuadro comparativo de las características de la planta y la remoción de nutrientes.

Día	Altura de la totora promedio	Densidad promedio de la totora	Remoción de N-total	Remoción de N-amoniaco	Remoción de Nitratos	Remoción de P-total	Remoción de Ortofosfatos	Remoción de Anhídrido fosfórico
07/12/2013	40.00	3.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
14/12/2013	44.60	3.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
21/12/2013	49.80	3.33	76.9	76.6	76.8	44.7	44.1	43.9
28/12/2013	50.91	3.67	NR	NR	NR	33.3	31.9	32.4
04/01/2014	56.27	3.67	NR	NR	NR	NR	NR	NR
11/01/2014	53.79	4.67	NR	NR	NR	NR	NR	NR
18/01/2014	63.94	5.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
25/01/2014	67.56	6.00	NR	NR	NR	NR	NR	NR
01/02/2014	59.72	8.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
08/02/2014	55.19	10.67	NR	NR	NR	NR	NR	NR
15/02/2014	55.30	12.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
22/02/2014	56.86	14.00	NR	NR	NR	NR	NR	NR
01/03/2014	61.67	15.00	NR	NR	NR	NR	NR	NR
08/03/2014	66.55	15.67	-4.0	78.10	97.10	-6.0	56.1	-36.0
15/03/2014	74.13	15.67	33.0	-665.20	-115.60	20.0	44.5	28.0
22/03/2014	81.32	15.67	-63.0	56.20	-484.80	-100.0	-107.7	-20.7
29/03/2014	88.77	15.67	37.5	37.50	37.70	13.3	16.5	16.2
05/04/2014	92.02	16.33	37.50	7.60	6.70	18	19.6	20.1
12/04/2014	97.32	16.67	7.40	8.30	8.40	25.5	26.7	25.7
19/04/2014	104.30	16.67	8.50	9.00	9.70	33.3	35.4	36.1
30/04/2014	111.36	16.67	10.30	16.00	16.00	13.8	13.8	14.1
03/05/2014	117.58	16.67	17.00	25.20	25.10	11.1	11.6	11.8
10/05/2014	123.70	16.67	25.30	20.20	19.80	16.5	16.5	16.5
17/05/2014	130.08	16.67	30.00	44.90	45.10	18.5	40.8	29.9
31/05/2014	142.24	16.67	51.70	50.00	49.70	44.4	24	33.3

Nota:

Periodo de arranque del HAFSS

NR: No se registra dato.



7.1. PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS

7.1.1. pH

Los niveles de pH del afluente y efluente registrados en el monitoreo del HAFSS presentan un comportamiento irregular como se puede apreciar en el Gráfico VI-1. En el afluente se presentan valores entre 6.82 y 8.08, mientras que en el efluente, los valores fluctúan entre 6.82 y 8.04.

La alta fluctuación del pH del efluente puede atribuirse al afluente, porque los valores obtenidos en el efluente dependen de las concentraciones con la que ingresa el afluente al HAFSS. Como se mencionó, los valores de pH del afluente son variables (ver Anexo 4 y Gráfico VI-1), y esto se debe a que el agua residual tratada en la PTAR de Esmeralda Corp S.A.C. proviene de diferentes fuentes: agroindustrial, frigorífico, hidrobiológico e industria cárnica (actividades productivas desarrolladas en las instalaciones de Esmeralda Corp S.A.C.), según lo descrito en la *sección 5.2: Método*, cuya producción no es constante, haciendo que la calidad del agua residual que ingresa a la PTAR sea variable diariamente, obteniéndose un valor de pH fluctuante.

De los resultados obtenidos, en la semana del 17 de mayo del 2014 se registró un valor bajo de pH en el afluente (7.10), debido a que en la PTAR ingresó un mayor caudal de agua residual proveniente del procesamiento de pota (actividad hidrobiológica), el cual presenta un valor de pH ligeramente ácido (menor a 6), según la bibliografía revisada. Por lo que, en esa semana, también se presentó un valor de pH bajo (7.05) en el efluente.

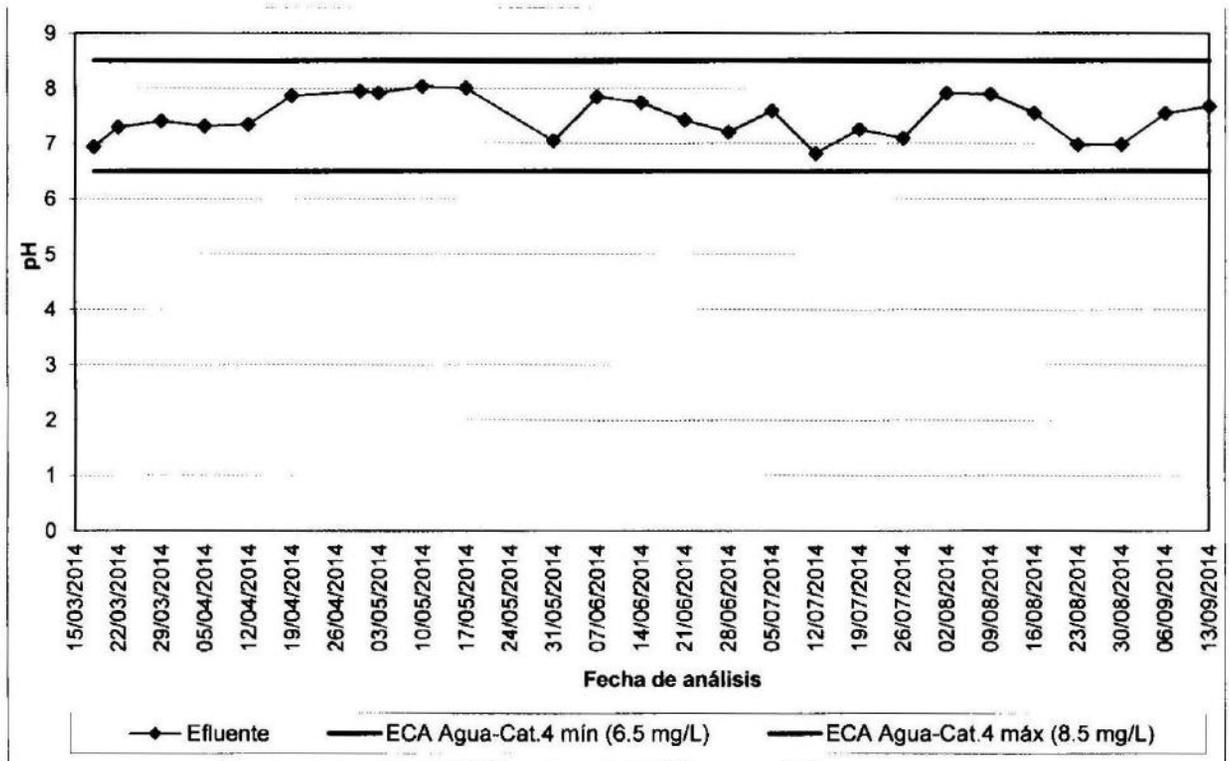
A partir de esa fecha, se registró una alta fluctuación de los valores de pH en el efluente, presentándose los valores más bajos los días 12 de julio, 23 de agosto y 30 de agosto de 2014 (6.82, 6.98 y 6.99 respectivamente), dichos valores no se pueden correlacionar con los valores de pH del afluente porque no presentan la misma tendencia, por tanto, puede atribuirse a una lectura errada del peachímetro digital.

Durante los seis (06) meses de monitoreo, la mayoría de valores registrados correspondientes al efluente son menores que los del afluente (ver Anexo 4), lo que indica que la acción conjunta de las raíces de la totora y de los microorganismos presentes en el sustrato del HAFSS reduce el nivel de pH, haciendo que en el medio se incremente los iones $[H]^+$, y por ende, sea más ácido de modo que sea el medio adecuado para la remoción de nitrógeno y fósforo del afluente.

Por otro lado, para la evaluación de la calidad del efluente en términos de pH para un posterior reuso en acuicultura, se ha comparado los valores de pH del efluente con el *ECA Agua Categoría 4: Conservación del ambiente*

En ese sentido, en el Gráfico VII-1 se aprecia que los valores de pH registrados del efluente se encuentran dentro del rango establecido por el ECA-Agua (6,5 – 8,5), lo que nos indica que de manera referencial, en términos de pH este efluente es apto para la conservar los organismos presentes en un ambiente acuático, es decir, para su reuso en la acuicultura.

Gráfico VII-1 Comportamiento del pH del efluente en función del ECA-Agua



7.1.2. TURBIEDAD

Los valores de turbiedad del afluente y efluente registrados en el monitoreo del HAFSS presentan un comportamiento irregular como se puede apreciar en el Gráfico VI-2. En el afluente se presentan valores que fluctúan entre 0.60 y 6.97 NTU, mientras que en el efluente, los valores fluctúan entre 0.22 y 12.90 NTU.

Durante los dos (02) primeros meses de monitoreo, se presentan valores del efluente mayores que los del afluente (ver Anexo 4), el valor más elevado se registra en marzo y es de 12.90 NTU, debido a una desafortunada maniobra operacional que permitió el ingreso de mayor caudal, reduciendo así el tiempo de retención hidráulica, y generando una elevada turbiedad en el tanque final. En los últimos cuatro (04) meses, los valores de turbiedad del

⁽⁴⁾ Se considera el ECA-Agua Categoría 4 en Lagunas y Lagos, debido a que el cultivo de peces se realiza en estanques simulando una pequeña laguna, donde el agua es estancada.



efluente son menores a los del afluente, llegando el HAFSS a remover el 84% de turbiedad, lo que indica que los lechos del sustrato (confitillo y arena gruesa) han permitido retener gran cantidad de partículas sólidas en las biopelículas formadas en su superficie, por la acción bacteriana.

No se pudo evaluar la calidad del efluente en términos de turbiedad para un posterior reuso en la acuicultura, ya que no se ha establecido estándar para este parámetro en el ECA-Agua.

Es importante señalar los parámetros principales fueron comparados con estándares nacionales e internacionales con el objetivo de evaluar la calidad del efluente tratado para un posterior reuso en la acuicultura, es decir, su viabilidad para su reuso en la acuicultura. Los valores registrados del efluente se compararon con la categoría 4 de los estándares de calidad ambiental para agua (ECA-Agua), cuyo uso está destinado a la conservación de ambientes acuáticos, como estándares nacionales; y como estándares internacionales se utilizaron los valores guía de la EPA para reuso en ambientes naturales de los estados de Florida, Carolina del Norte y Washington, ya que no existen estándares para los parámetros evaluados (Nt , $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, Pt , PO_4^{3-} , P_2O_5) en los valores guía de la OMS.

7.2.1. NITRÓGENO TOTAL (Nt)

Las concentraciones de Nt en el afluente y efluente presentan un comportamiento regular, la mayoría de valores registrados del efluente son menores a los del afluente (ver Gráfico VI-4). En el afluente se registran concentraciones de Nt que fluctúan entre 43 a 575 mg/L, y en el efluente fluctúan entre 15.5 a 105 mg/L.

Durante el primer mes, en el efluente se presentan mayores concentraciones de Nt que en el afluente, lo que indica que la remoción de Nt en el HAFSS fue mínima, lo que puede deberse a que la totora recién se estaba aclimatando y la acción de sus raíces no era tan eficiente. En los cinco (05) meses posteriores, las concentraciones de Nt del efluente presentan un comportamiento decreciente en función al tiempo y a la concentración del afluente, es decir, los valores del efluente son menores a los del afluente. Registrando un mayor rango de diferencia entre los valores del afluente y efluente durante los dos últimos meses (julio y agosto). Siendo, la menor concentración registrada del efluente de 15.5 mg/L para un afluente de 125 mg/L (ver Anexo 4).

Además, como se puede apreciar en el Gráfico VI-5, el rendimiento del tratamiento mediante el HAFSS presenta un comportamiento irregular durante el primer mes, confirmando lo anteriormente mencionado sobre las elevadas concentraciones presentadas en el efluente. En los cinco (05) meses siguientes, ya se puede apreciar un comportamiento regular del rendimiento o eficiencia del HAFSS para la remoción de este parámetro (Nt), que se incrementa en función del tiempo. Presentando así, un mayor rendimiento en los dos últimos meses de monitoreo, registrando valores entre 44% y 87.8% (ver Anexo 4). Esto señala, que las raíces de la totora se afianzaron en esos meses, pudiendo crecer y tener mayor profundidad para asimilar mayor nitrógeno del afluente que permita el crecimiento de la biomasa de la totora. Además, durante los primeros días de julio se realizaron dos podas de las totoras que estaban marchitas, lo que permitió mayores brotes de totoras que asimilaban mayores concentraciones de

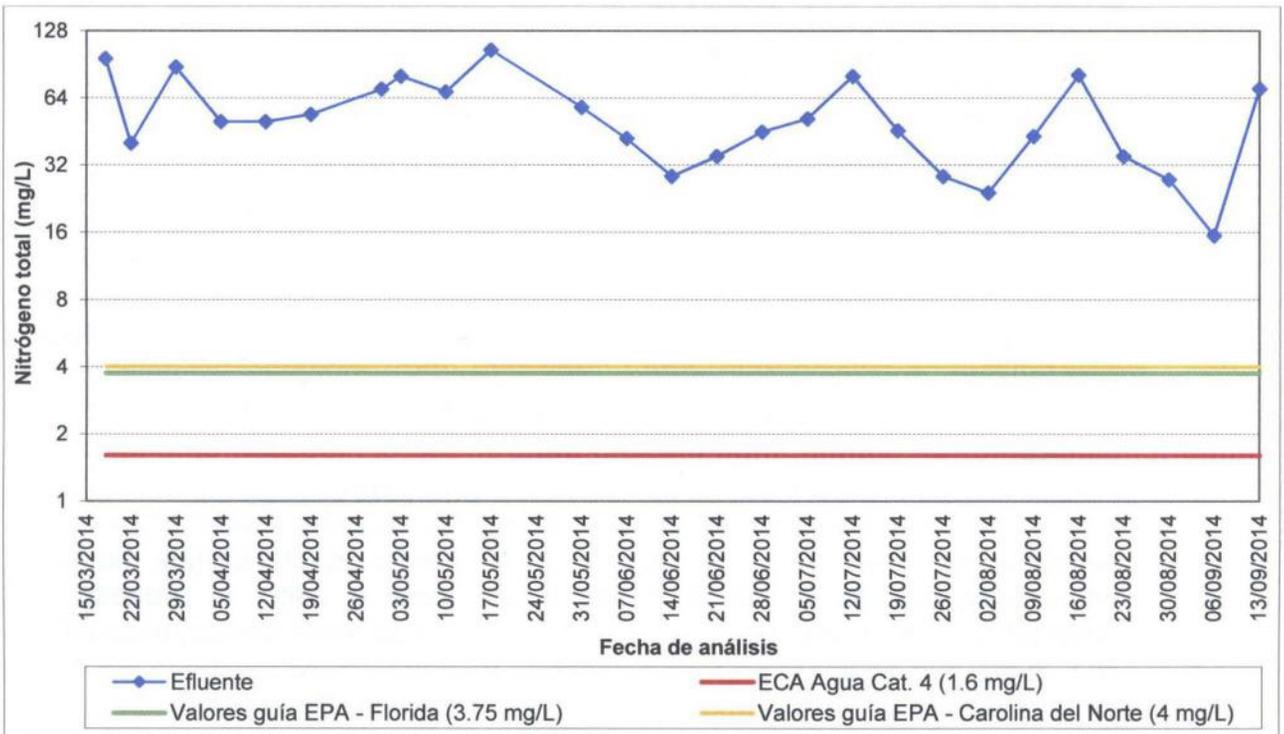
nitrógeno. Cabe señalar que, a través de las raíces se adiciona oxígeno al agua presente en el HAFSS, de modo que, se incrementa la acción de las bacterias nitrificantes propias del afluente para remover nitrógeno.

Es importante señalar que, en el último mes los porcentajes de remoción registrados presentan un comportamiento casi estable, indicando que en un tiempo más se llegará a alcanzar el máximo rendimiento.

En relación a los valores de flujo másico en función del rendimiento para el Nt, se observa en el Gráfico VI-6 que presenta un comportamiento irregular, es decir, los valores son fluctuantes; determinando que el mayor rendimiento del HAFSS en términos de Nt se obtiene con un valor de flujo másico de 3.38 mg/s.

Por otro lado, se evaluará la calidad del efluente en términos de Nt para un posterior reuso en la acuicultura, para la cual se ha comparado los valores de Nt del efluente con el *ECA Agua Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, en Lagunas y Lagos (ECA-Agua)* de manera referencial, considerando la concentración de Nt establecida en el ECA-Agua de 1.6 mg/L como límite máximo referencial. En ese sentido, en el Gráfico VII-2 se observa que las concentraciones de Nt del efluente registradas son mayores a la concentración establecida en el ECA-Agua, indicando así que en términos de Nt este efluente no sería apto para conservar organismos en un ambiente acuático, sin embargo, como se mencionó anteriormente este estándar es referencial porque es aplicable a la calidad de agua de cuerpos de agua naturales, no para la calidad de agua de reuso.

Finalmente, así como se comparó los resultados del Nt obtenidos en el efluente con el estándar nacional establecido en el ECA-Agua –a fin de evaluar su calidad para un posterior reuso en la acuicultura– se comparará dichas concentraciones con estándares internacionales. Para lo cual se utilizaron los valores guía de la EPA de los estados de Florida y Carolina del Norte como valores de referencia; el reuso de dichos valores está destinado a ambientes naturales (humedales, ríos, humedales artificiales). Como se puede observar en el Gráfico VII-2, las concentraciones de Nt del efluente superan los valores guía de la EPA de Florida (3.75 mg/L) y los valores guía de la EPA de Carolina del Norte (4 mg/L), indicando así que su reuso no sería apto en ambientes naturales y debería tener algún tratamiento adicional, sin embargo, como se mencionó anteriormente estos estándares son referenciales porque su reuso no es destinado a la acuicultura propiamente.



7.2.2. NITRÓGENO AMONIACAL (N-NH₄⁺)

Las concentraciones registradas en el afluente y efluente para N-NH₄⁺ presentan un comportamiento regular, la mayoría de concentraciones del efluente son menores que las del afluente (Gráfico VI-7). En el afluente se registran concentraciones que fluctúan entre 23 y 690 mg/L, mientras que en el efluente fluctúan entre 18.6 y 176 mg/L.

Al igual que el comportamiento del Nt, durante el primer mes se presentan mayores concentraciones de N-NH₄⁺ en el efluente que el afluente, lo que indica que la remoción de N-NH₄⁺ en el HAFSS fue mínima, lo que podría atribuirse al inicio del proceso de aclimatación de la totora en el HAFSS, en el cual sus raíces recién estaban creciendo y no eran lo suficientemente profundas para poder oxigenar el medio, y así incrementar la acción bacteriana, asimismo no se podía captar mayores concentraciones de N-NH₄⁺, lo que se traduce en bajo nivel de remoción y hasta un incremento de N-NH₄⁺ en el efluente. En los cinco (05) meses siguientes, las concentraciones de N-NH₄⁺ del efluente presentan un comportamiento decreciente en función al tiempo y a la concentración del afluente, es decir, los valores del efluente son menores a los del afluente.

Durante los dos últimos meses (julio y agosto), se registra un mayor rango de diferencia entre los valores del afluente y efluente. Presentándose como la menor concentración registrada del efluente, el valor de 18.6 mg/L para un afluente de 152.5 mg/L (ver Anexo 4).

Asimismo, como se puede apreciar en el Gráfico VI-8, el rendimiento del tratamiento mediante el HAFSS presenta un comportamiento irregular durante el primer mes, confirmando lo anteriormente mencionado sobre las elevadas concentraciones presentadas en el efluente. En los cinco (05) meses posteriores, el comportamiento del rendimiento o eficiencia del HAFSS para la remoción de este parámetro (N-NH_4^+) es regular, que se incrementa en función del tiempo. Registrándose así, un mayor rendimiento en los dos últimos meses de monitoreo, presentando valores entre 38.3% y 90% (ver Anexo 4). Es importante señalar que durante los primeros días de julio se realizaron dos podas de las totoras que estaban marchitas, lo que permitió mayores brotes de totoras que asimilaban mayores concentraciones de nitrógeno amoniacal. Entonces, las raíces de la totora tuvieron mayor profundidad durante esos meses, permitiendo un mayor suministro de oxígeno que indujo al incremento de la acción bacteriana. Las bacterias nitrificantes en presencia de oxígeno transforman el nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) en ión amonio (NH_4^+) mediante un proceso conocido como amonificación, luego, ocurre el proceso de nitrificación donde el NH_4^+ se convierte en nitrato (NO_3^-) por acción de las bacterias nitrificantes, también en condiciones aeróbicas. Por último, se lleva a cabo el proceso de desnitrificación, donde las bacterias, en condiciones anaeróbicas, reducen el NO_3^- a N_2 , que se libera en forma gaseosa al ambiente, removiendo así el N-NH_4^+ presente en el afluente. Además, el incremento de la remoción puede atribuirse a que la mayor profundidad de las raíces de la totora permite que se capte mayores concentraciones de N-NH_4^+ que son asimiladas por la planta para incrementar su biomasa. Y también, a la adsorción directa de este parámetro a la superficie de los lechos del sustrato (confitillo y arena gruesa).

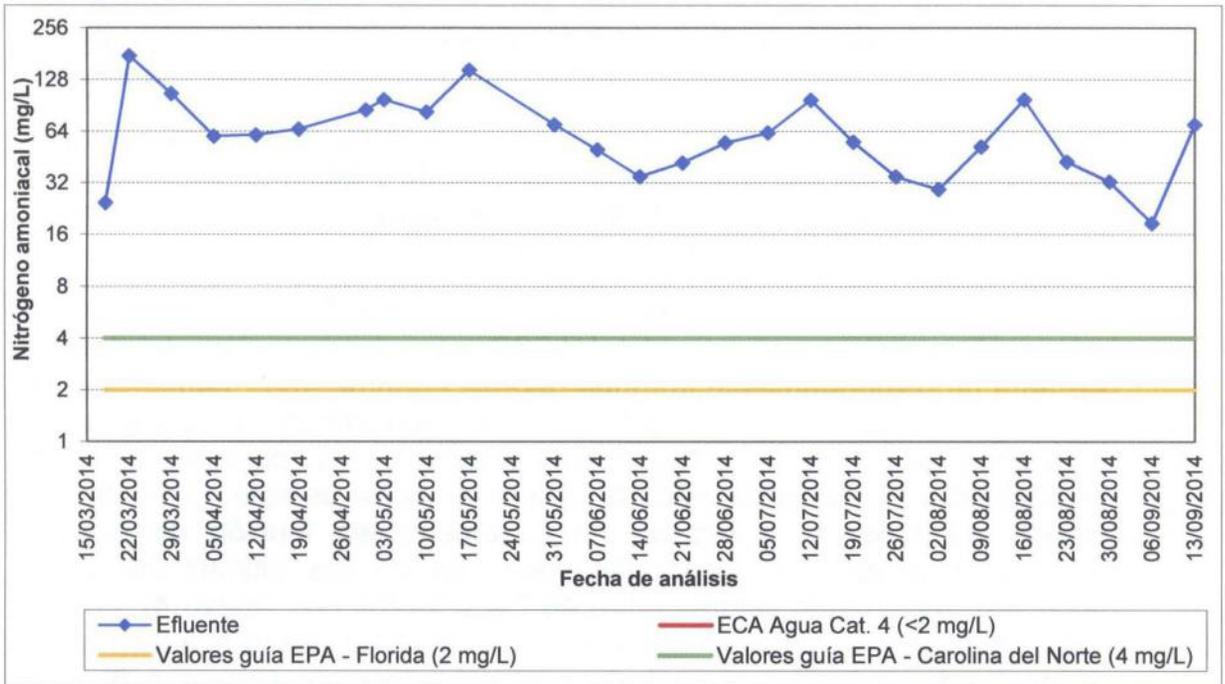
En el último mes los porcentajes de remoción registrados presentan un comportamiento casi estable, indicando que pronto se llegará a alcanzar el máximo rendimiento del HAFSS.

En relación a los valores de flujo másico en función del rendimiento para el N-NH_4^+ , se observa en el Gráfico VI-9 que presenta un comportamiento uniforme; obteniéndose el mayor rendimiento del HAFSS en términos de N-NH_4^+ con un valor de flujo másico de 4.06 mg/s.

A continuación, se evaluará la calidad del efluente en términos de N-NH_4^+ para un posterior reuso en la acuicultura, para lo cual se ha comparado los valores de N-NH_4^+ del efluente con el *ECA Agua Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, en Lagunas y Lagos (ECA-Agua)* de manera referencial, considerando la concentración N-NH_4^+ establecida en el ECA-Agua de <0.2 mg/L como límite máximo referencial. En ese sentido, en el Gráfico VII-3, se observa que las concentraciones de N-NH_4^+ registradas en el efluente sobrepasan a la concentración establecida en el ECA-Agua, indicando así que en términos de N-NH_4^+ , este efluente no sería apto para conservar organismos en un ambiente acuático, sin embargo, como se mencionó anteriormente este estándar es referencial porque es aplicable a la calidad de agua de cuerpos de agua naturales, no para la calidad de agua de reuso.

Finalmente, así como se comparó los resultados del $N-NH_4^+$ obtenidos en el efluente con el estándar nacional establecido en el ECA-Agua –a fin de evaluar su calidad para un posterior reuso en la acuicultura– se comparará dichas concentraciones con estándares internacionales. Para lo cual se utilizaron los valores guía de la EPA de los estados de Florida y Carolina del Norte como valores de referencia, cuyo reuso está destinado a ambientes naturales (humedales, ríos, humedales artificiales). En ese sentido, se observa en el Gráfico VII-3 que durante todo el período de monitoreo los valores de $N-NH_4^+$ en el efluente supera los valores guía de la EPA de Florida (2 mg/L) así como los valores de la EPA de Carolina del Norte (4 mg/L), indicando de esta manera que el reuso del efluente no sería apto en ambientes naturales sin un tratamiento adicional, sin embargo, como se mencionó previamente estos estándares son referenciales porque no están destinados al reuso en la acuicultura propiamente.

Gráfico VII-3 Comportamiento del $N-NH_4^+$ del efluente en función del ECA-Agua y los valores guía EPA



Las concentraciones registradas en el afluente y efluente para N-NO₃⁻ presentan un comportamiento regular, la mayoría de concentraciones del efluente son menores que las del afluente (Gráfico VI-10). En el afluente se registran concentraciones que fluctúan entre 22.3 y 2545 mg/L, mientras que en el efluente fluctúan entre 10 y 532.8 mg/L.

De la misma manera que los parámetros Nt y N-NH₄⁺, durante el primer mes se presentan mayores concentraciones de N-NO₃⁻ en el efluente que el afluente, lo que indica que la remoción de N-NO₃⁻ en el HAFSS fue mínima, esto podría atribuirse a que las raíces de la totora en el HAFSS no eran lo suficientemente profundas para poder oxigenar el medio y así incrementar la acción bacteriana, asimismo las raíces no podían asimilar mayores concentraciones de N-NO₃⁻, lo que se traduce en bajo nivel de remoción y hasta un incremento de N-NO₃⁻ en el efluente. En los cinco (05) meses siguientes, las concentraciones de N-NO₃⁻ del efluente presentan un comportamiento decreciente en función al tiempo y a la concentración del afluente, es decir, los valores del efluente son menores a los del afluente.

Durante los tres últimos meses (junio, julio y agosto), se registra un mayor rango de diferencia entre los valores del afluente y efluente. Registrándose como la menor concentración presentada del efluente, el valor de 10 mg/L para un afluente de 2545 mg/L (ver Anexo 4).

Asimismo, como se puede apreciar en el Gráfico VI-11, el rendimiento del tratamiento mediante el uso del HAFSS para la remoción del N-NO₃⁻ presenta un comportamiento irregular durante el primer mes, confirmando lo anteriormente mencionado sobre las elevadas concentraciones presentadas en el efluente. En los cinco (05) meses posteriores, el comportamiento del rendimiento o eficiencia del HAFSS para la remoción de este parámetro (en función del N-NO₃⁻) es regular, se incrementa en función del tiempo. Presentándose así, un mayor rendimiento en los dos últimos meses de monitoreo, registrando valores entre 46.7% y 99.6% (ver Anexo 4). Lo que indica, que se mantuvieron las condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno) adecuadas en el sustrato y el pH adecuado (mayor a 6) para permitir que se lleve a cabo el proceso de desnitrificación, donde las bacterias anaeróbicas reducen el NO₃⁻ a N₂, que se libera en forma gaseosa al ambiente, removiendo así el N-NO₃⁻ presente en el afluente. Es importante señalar que durante los primeros días de julio se realizaron dos podas de las totoras que estaban marchitas, lo que permitió mayores brotes de totoras que asimilaban mayores concentraciones de nitratos. En ese sentido, el incremento de la remoción también se puede atribuir a la asimilación de NO₃⁻ por acción de las raíces de la totora para incrementar su biomasa. Asimismo, a la adsorción directa de este parámetro a la superficie de los lechos del sustrato (confitillo y arena gruesa).

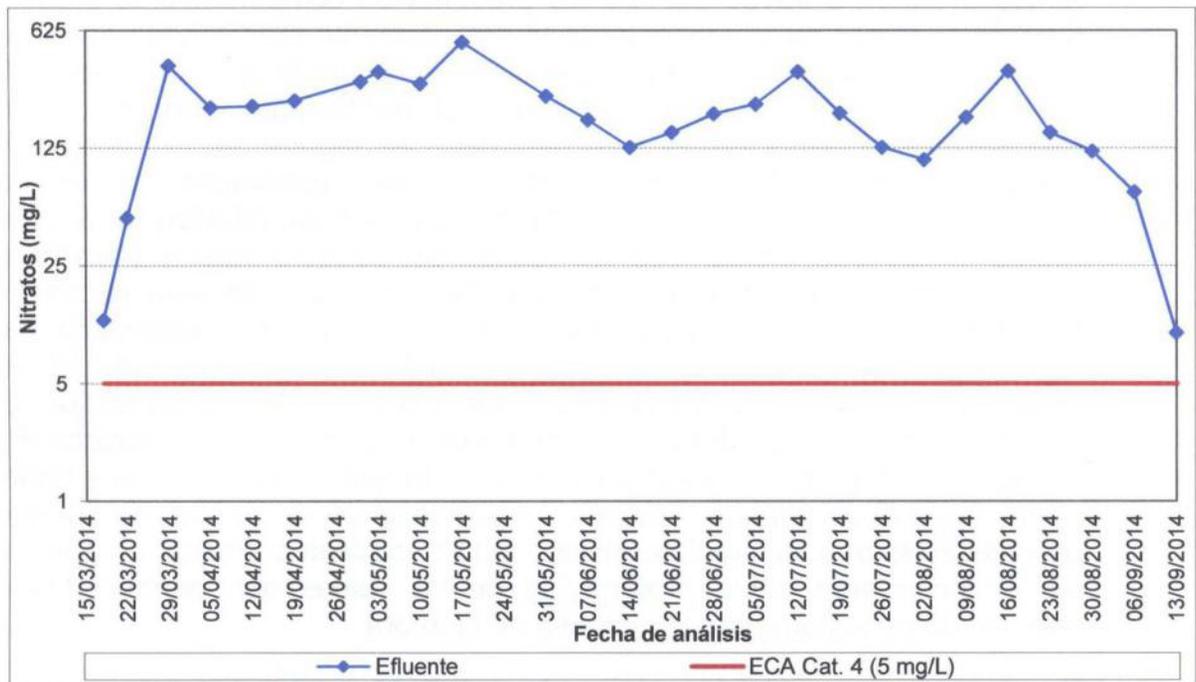
En el último mes los porcentajes de remoción registrados presentan un comportamiento casi estable, indicando que pronto se llegará a alcanzar el máximo rendimiento del HAFSS.

En lo que respecta a los valores de flujo másico en función del rendimiento para el N-NO_3^- , se observa en el Gráfico VI-12 que presenta un comportamiento uniforme; determinando que el mayor rendimiento del HAFSS en términos de N-NO_3^- se obtiene con un valor de flujo másico de 14.97 mg/s.

Por otro lado, se evaluará la calidad del efluente en términos de N-NO_3^- para un posterior reuso de este en la acuicultura, para la cual se ha comparado los valores de N-NO_3^- del efluente con el *ECA Agua Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, en Lagunas y Lagos (ECA-Agua)* de manera referencial, considerando la concentración de N-NO_3^- establecida en el ECA-Agua de 5 mg/L como límite máximo referencial. En ese sentido, en el Gráfico VII-4 se observa que las concentraciones de N-NO_3^- del efluente registradas son mayores a la concentración establecida en el ECA-Agua, indicando de esta manera que en términos de N-NO_3^- el efluente no sería apto para conservar organismos en un ambiente acuático, sin embargo, como se mencionó anteriormente este estándar es referencial porque es aplicable a la calidad de agua de cuerpos de agua naturales, no para la calidad de agua de reuso, debido a que no existe normativa que regule ese uso.

Este parámetro no se pudo comparar con los estándares internacionales, valores guía de la EPA de Florida y Carolina del Norte, porque no existen valores para dicho parámetro.

Gráfico VII-4 Comportamiento del N-NO_3^- del efluente en función del ECA-Agua





Los niveles registrados de Pt en el afluente y efluente presentan un comportamiento regular, la mayoría de concentraciones del efluente son menores que las del afluente (ver Gráfico VI-13). En el afluente se registran concentraciones que fluctúan entre 2 y 15.5 mg/L, mientras que en el efluente fluctúan entre 0.3 y 7.5 mg/L.

Durante el primer mes se presentan mayores concentraciones de Pt en el efluente que el afluente, lo que indica que hubo una remoción mínima de Pt en el HAFSS, que podría atribuirse a la poca profundidad de las raíces de la totora en el HAFSS que no permitía asimilar mayores concentraciones de Pt, y a que todavía no se adsorbía Pt en la superficie del sustrato, lo que se traduce en bajo nivel de remoción y hasta un incremento de Pt en el efluente. En los cinco (05) meses siguientes, las concentraciones de Pt del efluente presentan un comportamiento decreciente en función al tiempo y a la concentración del afluente, es decir, los valores del efluente son menores a los del afluente.

Durante los tres últimos meses (junio, julio y agosto), se presenta un mayor rango de diferencia entre los valores del afluente y efluente. Observándose que la menor concentración registrada del efluente es de 0.3 mg/L para un afluente de 6 mg/L (ver Anexo 4).

Asimismo, como se puede apreciar en el Gráfico VI-14, el rendimiento de la remoción de Pt a través del HAFSS presenta un comportamiento irregular durante el primer mes, confirmando lo anteriormente mencionado sobre las elevadas concentraciones presentadas en el efluente. En los cinco (05) meses posteriores, el comportamiento del rendimiento o eficiencia del HAFSS para la remoción de este parámetro es regular, se incrementa en función del tiempo. Registrándose así, un mayor rendimiento en los dos últimos meses de monitoreo, presentando valores entre 68.3% y 94.5% (ver Anexo 4). Lo que indica, que los lechos del sustrato (arena y confitillo) presentaron un área superficial lo suficientemente grande para permitir la adsorción del Pt a través de sus poros, además, otro mecanismo que remueve Pt, pero en menor proporción, es la biodegradación de Pt por acción de los microorganismos adsorbidos a la superficie de los lechos. Es importante señalar que durante los primeros días de julio se realizaron dos podas de las totoras que estaban marchitas, lo que permitió mayores brotes de totoras que asimilaban mayores concentraciones de fósforo. Es así que, otro mecanismo adicional de remoción del Pt, también en menor proporción, fue el incremento de la profundidad de las raíces que permitió mayor asimilación de fósforo para la biomasa de la totora.

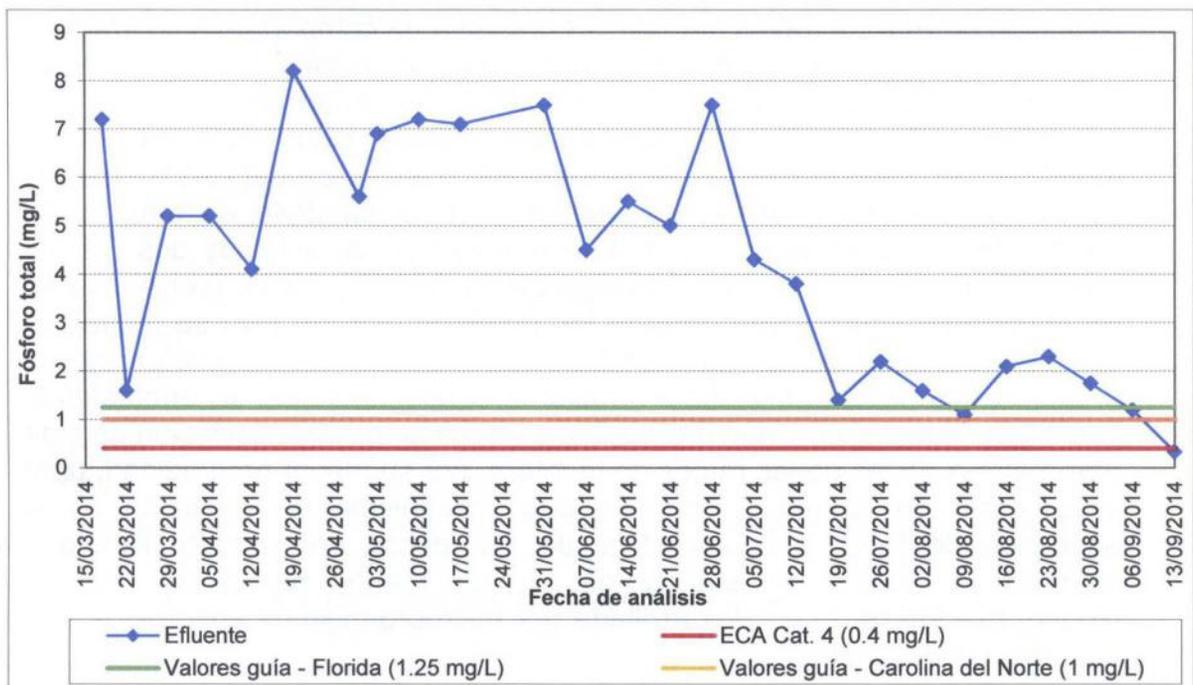
En el último mes los porcentajes de remoción registrados presentan un comportamiento casi estable, indicando que próximamente se llegará a alcanzar el máximo rendimiento del HAFSS.

Por otro lado, se evaluará la calidad del efluente en términos de Pt para un posterior reuso del efluente en la acuicultura, para la cual se ha comparado los valores de Pt del efluente con el *ECA Agua Categoría 4: Conservación*

del ambiente acuático, en Lagunas y Lagos (ECA-Agua) de referencia, considerando la concentración de Pt establecida en el ECA-Agua de 0.4 mg/L como límite máximo referencial. En ese sentido, en el Gráfico VII-5 se observa que las concentraciones de Pt del efluente registradas son mayores a la concentración establecida en el ECA-Agua, indicando así que en términos de Pt el efluente no sería apto para conservar organismos en un ambiente acuático, sin embargo, como se mencionó anteriormente este estándar es referencial porque es aplicable a la calidad de agua de cuerpos de agua naturales, no para la calidad de agua de reuso, debido a que no existe normativa que regule ese uso.

Finalmente, así como se comparó los resultados del Pt obtenidos en el efluente con el estándar nacional establecido en el ECA-Agua –con el objetivo de evaluar su calidad para un posterior reuso en la acuicultura– se comparará dichas concentraciones con estándares internacionales. En ese sentido, se utilizaron los valores guía de la EPA de Florida y Carolina del Norte como valores de referencia, cuyo reuso están destinados a ambientes naturales (humedales, ríos, humedales artificiales). Como se puede observar en el Gráfico VII-5, la mayoría de las concentraciones de Pt del efluente superan los valores guía de la EPA de Florida (1.25 mg/L) y los valores guía de la EPA de Carolina del Norte (1 mg/L), indicando que su reuso no sería apto en ambientes naturales sin tener algún tratamiento adicional, sin embargo, como se mencionó anteriormente estos estándares son referenciales porque su reuso no es destinado a la acuicultura propiamente.

Gráfico VII-5 Comportamiento del Pt del efluente en función del ECA-Agua



Las concentraciones registradas de PO_4^{3-} en el afluente y efluente presentan un comportamiento regular, la mayoría de concentraciones del efluente son menores que las del afluente (ver Gráfico VI-15). En el afluente se registran concentraciones que fluctúan entre 7.8 y 48.1 mg/L, mientras que, en el efluente fluctúan entre 0.11 y 23.3 mg/L.

Durante el primer mes se presentan mayores concentraciones de Pt en el efluente que el afluente, lo que indica que hubo una remoción mínima de Pt en el HAFSS, que podría atribuirse a la poca profundidad de las raíces de la totora en el HAFSS que no permitía asimilar mayores concentraciones de PO_4^{3-} , y a que todavía no se adsorbía PO_4^{3-} en la superficie del sustrato, lo que se traduce en bajo nivel de remoción y hasta un incremento de PO_4^{3-} en el efluente. En los cinco (05) meses posteriores, las concentraciones de PO_4^{3-} del efluente presentan un comportamiento decreciente en función al tiempo y a la concentración del afluente, es decir, los valores del efluente son menores a los del afluente.

Al igual que el comportamiento del Pt, el PO_4^{3-} presenta un mayor rango de diferencia entre los valores del afluente y efluente durante los tres últimos meses (junio, julio y agosto). Observándose que la menor concentración registrada del efluente es de 0.11 mg/L para un afluente de 18.6 mg/L (ver Anexo 4).

Asimismo, como se puede apreciar en el Gráfico VI-16, el rendimiento de la remoción de PO_4^{3-} a través del HAFSS presenta un comportamiento irregular durante el primer mes, confirmando lo anteriormente mencionado sobre las elevadas concentraciones presentadas en el efluente al inicio del tratamiento. Posteriormente, durante los últimos cinco (05) meses de monitoreo, el comportamiento del rendimiento o eficiencia del HAFSS para la remoción de este parámetro es regular, incrementándose en función del tiempo. Presentándose así, un mayor rendimiento durante los dos últimos meses de monitoreo, registrando valores entre 68.4% y 99.4% (ver Anexo 4). Es importante señalar que durante los primeros días de julio se realizaron dos podas de las totoras que estaban marchitas, lo que permitió mayores brotes de totoras que asimilaban mayores concentraciones de ortofosfatos. En ese sentido, la remoción de PO_4^{3-} se debió a la mayor asimilación de este parámetro a través de las raíces de la totora, por su mayor profundidad, para incrementar su biomasa. Además, otro mecanismo de remoción es la adsorción de PO_4^{3-} a la superficie de los lechos del sustrato (arena y confitillo) a través de sus poros, y, en menor proporción, por la biodegradación de PO_4^{3-} desarrollada por microorganismos adsorbidos a la superficie de los lechos.

En el último mes los porcentajes de remoción registrados presentan un comportamiento casi estable e incremento, indicando que próximamente se llegará a alcanzar el máximo rendimiento del HAFSS.

No se pudo evaluar la calidad del efluente en términos de PO_4^{3-} para un posterior reuso en la acuicultura, debido a que no se ha establecido un estándar nacional ni internacional para este parámetro.

7.2.6. ANHÍDRIDO FOSFÓRICO (P_2O_5)

Las concentraciones registradas de P_2O_5 en el afluente y efluente presentan un comportamiento regular, la mayoría de concentraciones del efluente son menores que las del afluente (ver Gráfico VI-17). En el afluente se registran concentraciones que fluctúan entre 5 y 35.7 mg/L, mientras que, en el efluente fluctúan entre 0.78 y 18.8 mg/L.

Durante el primer mes se presentan mayores concentraciones de P_2O_5 en el efluente que el afluente, lo que indica que hubo una remoción mínima de P_2O_5 en el HAFSS, que podría atribuirse a la poca profundidad de las raíces de la totora en el HAFSS que no permitía asimilar mayores concentraciones de P_2O_5 , y a que todavía no se adsorbía P_2O_5 en la superficie del sustrato, lo que se traduce en bajo nivel de remoción y hasta un incremento de P_2O_5 en el efluente. En los cinco (05) meses posteriores, las concentraciones de P_2O_5 del efluente presentan un comportamiento decreciente en función al tiempo y a la concentración del afluente, es decir, los valores del efluente son menores a los del afluente.

Al igual que el comportamiento del Pt y del PO_4^{3-} , el P_2O_5 presenta un mayor rango de diferencia entre los valores del afluente y efluente durante los tres últimos meses (junio, julio y agosto). Observándose que la menor concentración registrada del efluente es de 0.78 mg/L para un afluente de 13.8 mg/L (ver Anexo 4).

Asimismo, como se puede apreciar en el Gráfico VI-18, el rendimiento de la remoción de P_2O_5 a través del HAFSS presenta un comportamiento irregular durante el primer mes, confirmando lo anteriormente mencionado sobre las elevadas concentraciones presentadas en el efluente al inicio del tratamiento. Posteriormente, durante los últimos cinco (05) meses de monitoreo, el comportamiento del rendimiento o eficiencia del HAFSS para la remoción de este parámetro es regular, incrementándose en función del tiempo. Registrándose así, un mayor rendimiento durante los dos últimos meses de monitoreo, presentando valores entre 87% y 94% (ver Anexo 4). Es importante señalar que durante los primeros días de julio se realizaron dos podas de las totoras que estaban marchitas, lo que permitió mayores brotes de totoras que asimilaban mayores concentraciones de anhídrido fosfórico. Considerando lo mencionado, el incremento de la profundidad de las raíces de la totora permitió una mayor asimilación de P_2O_5 que sirvió para incrementar su biomasa. Además, otro mecanismo de remoción es la adsorción de P_2O_5 a la superficie de los lechos del sustrato (arena y confitillo) a través de sus poros, y en menor proporción, la biodegradación de P_2O_5 por los microorganismos adsorbidos a la superficie de los lechos.

En el último mes los porcentajes de remoción registrados presentan un comportamiento y crecimiento casi estable, indicando que próximamente se llegará a alcanzar el máximo rendimiento del HAFSS.

No se pudo evaluar la calidad del efluente en términos de P_2O_5 para un posterior reuso en la acuicultura, debido a que no se ha establecido un estándar nacional ni internacional para este parámetro.

7.3. EVOLUCIÓN DE LA TOTORA EN FUNCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL HAFSS

Complementariamente a la evaluación de la eficiencia del HAFSS se llevó un registro de las características de las totoras como altura alcanzada y su densidad promedio durante el período de arranque y los tres primeros meses de funcionamiento del HAFSS (desde marzo hasta mayo) (ver Cuadro VI-1, Anexo 8).

De los resultados, se presentó una tendencia creciente de la remoción en función de la altura y densidad, es decir, que a medida que la altura y densidad de la totora se incrementa, el porcentaje de remoción de los nutrientes es mayor (Gráfico VI-19). Esto se debe a que a mayor crecimiento de la parte aérea de los plantones de totora, las raíces serán más profundas, de modo que puedan absorber un mayor volumen de agua del afluente, y así asimilar una mayor concentración de nutrientes del afluente, que se traduce en una mayor remoción.

Sin embargo, como se observa en el Gráfico VI-19, en el mes de marzo se registró unos valores anormales del rendimiento del HAFSS (valores muy por debajo de la tendencia), esto debido a una desafortunada maniobra operacional que permitió el ingreso de mayor caudal, reduciendo así el tiempo de retención hidráulica, y generando una elevada turbiedad en el tanque final.

Finalmente, se recomienda que en una próxima investigación se registre las características de la vegetación emergente durante todo el funcionamiento del HAFSS, a fin de conocer con mayor detalle la influencia de la altura y la densidad de la especie en el rendimiento del sistema de tratamiento

Luego de llevar a cabo la investigación para evaluar el rendimiento del HAFSS, empleando *Typha domingensis Pers.* (totora), en la remoción de nitrógeno y fósforo del efluente de la PTAR de la empresa Esmeralda Corp S.A.C., se presentan las siguientes conclusiones:

1. El HAFSS empleando la totora ha sido eficiente para la remoción de nitrógeno en términos de nitrógeno total (Nt), nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) y de nitratos (N-NO₃⁻), luego de un período de funcionamiento de 9 meses. Así, se presentan como los mayores valores de remoción: 87.8%, para el Nt; 90% para el N-NH₄⁺; y 99.6% para el N-NO₃⁻.
2. En relación a la remoción de fósforo, se puede mencionar que el HAFSS empleando la totora ha sido eficiente en función del fósforo total (Pt), ortofosfatos (PO₄³⁻) y anhídrido fosfórico (P₂O₅). Presentándose como mayores valores de rendimiento: 94.5%, para el Pt; 99.4%, para el PO₄³⁻; y 94%, para el P₂O₅.
3. El efluente tratado por el HAFSS aún no podría ser reusado en la acuicultura, considerando los estándares establecidos en los ECA-Agua (Categoría 4) y en los valores guía de la EPA de los estados de Florida, Carolina del Norte y Washington (reuso en ambientes naturales). Según dichos estándares, dicho efluente debería tener un tratamiento adicional a fin de obtener una calidad apta para reusarlo en la acuicultura.
4. Por la alta eficiencia, bajos costos, facilidad en la operación y mantenimiento, y la semejanza de la calidad del afluente con un agua residual doméstica, el HAFSS podría ser utilizado en zonas rurales que carezcan de redes de alcantarillado público.

Asimismo, se pueden plantear algunas recomendaciones:

1. La estructura del HAFSS debe estar bien nivelada, es decir, luego de la excavación se debería uniformizar la estructura agregándole cemento y tarrajando la zanja realizada, antes de colocar la geomembrana, de modo que se permita obtener una mejor pendiente y evitar áreas muertas.
2. Como se mencionó anteriormente, el tiempo de poda de la vegetación emergente (totora) fue alrededor de 8 meses después del funcionamiento del HAFSS, lo cual retrasó un poco el alcance de sus máximos rendimientos. Por lo que, se recomienda que el tiempo de poda debe ser menor a 8 meses.
3. Este HAFSS se diseñó y operó con un bajo caudal y carga de nutrientes, se recomienda probar con mayores caudales y cargas.

4. A fin de que se asegure la continuidad de la medición de los parámetros del efluente en el HAFSS, se recomienda que el Laboratorio de Medio Ambiente de la PTAR incluya el monitoreo del efluente del HAFSS como parte de su programa de monitoreo de la PTAR.

5. Se recomienda que para una próxima investigación se lleve un registro de características de la vegetación emergente como altura y densidad de la especie durante el período de arranque y todo el período de funcionamiento del HAFSS, a fin de conocer con mayor detalle la influencia de estas características en el rendimiento del sistema de tratamiento.

- Autoridad Binacional del Lago Titicaca - ABLT. (2001). Programa de Capacitación sobre el Manejo de la Totora. Revisado en <http://www.alt-perubolivia.org>
- Arias, C. & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17-24.
- Arias, O. (2004). Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial Universidad Politécnica de Cataluña, Madrid, España.
- Aponte, H & Ramírez, D. (2011). Humedales de la Costa Central del Perú: Estructura y amenazas de sus comunidades vegetales. *Revista Ecología Aplicada*, 10(1), 31-39.
- Autoridad Nacional del Agua – ANA. (2009). Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338).
- Autoridad Nacional del Agua – ANA. (2012). Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (D.S. N° 001-2012-AG).
- Autoridad Nacional del Agua – ANA. (2013). Reglamento para el otorgamiento de autorizaciones de vertimiento y reuso de aguas residuales tratadas (R. J. N° 224-2013-ANA).
- Berezowsky, M. (1996). Constructed wetland for remediation of urban wastewaters. *Geoscience Canada*, 22, 129-141.
- Brix, H. (1995). Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. *Water Science and Technology*, 30.
- Castroviejo, S.; Luceño, M.; Galán, A.; Jiménez, P.; Cabezas, F.; L. Medina. (1986). Flora ibérica: plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares. Madrid, España.
- Centro Nacional del Agua - CENAGUA, Organización Panamericana de la Salud – OPS/OMS (1999). Estudios técnicos de sustitución aplicables al saneamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades: Sistema de tratamiento de aguas servidas por medio de humedales artificiales. Bogotá, Colombia: Sociedad Quebequense de Tratamiento de Aguas Residuales Canadá (SQAE).
- Consejo Nacional del Ambiente – CONAM. (2005). Ley General del Ambiente (Ley N° 28611).
- Curia, A. C.; Koppe, J.C.; Costa, J.F.; Féris, L.A.; Gerber, W.D. (2011). Implementación de un sistema piloto de humedales artificiales como

tratamiento terciario para la remoción de fósforo y nitrógeno ("Application of Pilot-Scale-Constructed Wetland as tertiary treatment system of wastewater for phosphorus and nitrogen removal"). *Water Air and Soil Pollution*, 218, 131-143.

Curt, M. (2012a). Fitodepuración en humedales. Conceptos generales. Manual de fitodepuración, filtro de macrófitas en flotación. Madrid, España. Revisado en <http://www.ciencias-marinas.uvigo.es>

Curt, M. (2012b). Macrófitas de interés en fitodepuración. Manual de fitodepuración, filtro de macrófitas en flotación. Madrid, España. Revisado en <http://www.ciencias-marinas.uvigo.es>

Delgadillo, O.; Camacho, A.; Perez, L. & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).

Estrada, I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

Francia, D.; Gonzáles, R; Flores, J.A.; Espinoza, M.; Sánchez, L.E. (2010). Remoción de nitrógeno y fósforo de aguas residuales domésticas mediante Humedales Artificiales. Revisado en www.uaemex.mx/

Gaboutloeloe, G. K.; Chen, S.; Barber, M.E.; Stöckle, C.O. (2008). Combinaciones del uso de humedales artificiales de flujo horizontal y vertical para mejorar la remoción de nitrógeno ("Combinations of horizontal and vertical flow constructed wetlands to improve nitrogen removal"). *Water Air and Soil Pollution*.

García, J.; Corzo, A. (2008). Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsoperficial.

Hoffmann, H.; Platzer, C.; Winker, M.; Von Muench, E. . (2011). *Revisión técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y domésticas*: Agencia de Cooperación Internacional Alemana - GIZ, Programa de Saneamiento Sostenible – ECOSAN.

Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA. (1998). Plan Maestro: Pantanos de Villa (Refugio de Vida Silvestre). Lima, Perú.

Kuschik, P.; Wiebner, A.; Kappelmeyer, U.; Weibbrodt, E.; Kästner, M.; Stottmeister, U. . (2003). Ciclo anual de remoción de nitrógeno en un humedal subsuperficial de flujo horizontal a escala piloto, construido bajo un clima templado ("Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate"). *Water Research*, 37, 4236-4242.

- Langergraber, G.; Leroch, K.; Pressi, A.; Rohrhofer, R.; Harberl, R. (2008). *Humedales Artificiales de flujo subsuperficial del tipo vertical para una alta tasa de remoción de nitrógeno* ("A two stage subsurface vertical flow constructed wetland for high-rate nitrogen removal"). *Water Science Technology*, 57, 1881-1887.
- Lara, J. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Llagas, W.; Guadalupe, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 15, 85-96.
- Londoño, L.; Marín, C. . (2009). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética.*, Universidad Tecnológica de Pereira., Colombia.
- López, S.; Gallegos, M; Pérez, L; Gutiérrez, C. (2005). *Mecanismos de fitorremediación*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 21, 91-100.
- Lüderitz, V.; Gerlach, F. (2002). *Remoción de fósforo en diferentes Humedales Artificiales* ("Phosphorus removal in different Constructed Wetland"). *Acta Biotechnologic.*, 22, 91-99.
- Miglio, R. (2003). *Sistema de tratamiento de aguas residuales con el uso de plantas acuáticas*, Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM, Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente – MINAM. (2008). *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua* (D.S. N° 002-2008-MINAM).
- Ministerio del Ambiente - MINAM. (2013). *Flora del Perú. Actualización de datos*. Lima, Perú. Revisado en <http://www.minam.gob.pe>
- Mitsch, W. J.; Wise, K.M. (1998). *Water quality, fate of metals, and predictive modal validation of a constructed wetland treating acid mine drainage*. *Water Research*, 32.
- Montoya, J. I.; Ceballos, L.; Casas, J.C.; Morató J. (2010). *Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en Humedales Construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas*. *Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 14, 75-84.
- Moore, B. C.; Lafer, J.E.; Funk, W.H. (1994). *Influence of aquatic macrophytes on phosphorus and sediment porewater chemistry in a freashwater wetland*. *Aquatic Botany*.

Mufarrege, M. (2012). Tolerancia y eficiencia de *Typha domingensis* Pers. en la retención de metales y nutrientes de efluentes industriales., Universidad Nacional del Litoral. Santa Fé, Argentina. Revisado en <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar>.

Osnaya, M. (2012). Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez., Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca, Mexico.

Organismo Mundial de la Salud – OMS. (2006). Valores guía de la OMS para el reuso de aguas residuales, excretas y aguas grises en la acuicultura ("Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater").

Peña, M.; Van Ginneken, M.; Madera, C. . (2003). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas tropicales. Ingeniería y Competitividad. Colombia.

Perez-Olmedilla, M.; Rojo, C. (2000). Función depuradora de los humedales I: Una revisión bibliográfica sobre el papel de los macrófitos. *Humedales Mediterráneos*, 1, 115-122.

Proosdij, V. (2001). Special detail: *Typha domingensis*, revisado en <http://www.dcbiodata.net>

Presidencia del Consejo de Ministros – PCM. (1993). Constitución Política del Perú.

Quipuzco, L. (2002). Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas., Universidad Nacional Agraria La Molina., Lima, Perú.

Radoux, M.; Kemp, D. (1982). Approche écologique et expérimentale des potentialités épuratrices de quelques héliophytes: *Phragmites australis*, *Typha latifolia* et *Carex acuta*. *Trib. Cebedau*.

Raúl, J.; Santamaría, B. (2012). Flora del Bajío y de Regiones adyacentes Vol. Fascículo 176. Familia Typhaceae. Revisado en <http://www1.inecol.edu.mx>

Ramirez-Carrillo, H. F.; Luna-Pabello, V.M.; Arredondo-Figueroa, J.L. (2009). Evaluación de un Humedal Artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química.*, 8, 93-99.

Reed, S. C., Crites, R.W., Middlebrooks, E.J. (1995). Design of subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. En: *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Second Edition. New York: McGraw-Hill.

Rodríguez-Monroy, J.; Durán de Bazúa, C. . (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología, Ciencia y Educación. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos*, 21, 25-33.

Romero-Aguilar, M.; Colín-Cruz, A.; Sánchez-Salinas, E.; Ortiz-Hernández, M.L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un Sistema Piloto de Humedales Artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25, 157-167.

Salas, M. (2009). Perfil bioecológico de las especies de flora y fauna más representativas. Lima, Perú.

Sanchez, D. (2011). *Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales*. España.

Seoáñez, M. (2004). Depuración de aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. (Ediciones Mundi-Prensa ed.). Madrid, España.

Silva, J. P. (2009). Humedales construidos. Colombia.

Stottmeister, U.; Wiessner, A.; Kusch, P.; Kappelmeyer, U.; Kastner, M.; Bederski O. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewaters treatment. *Biotechnology Advances*, 22, 93-117.

Strauffer, J. (1998). Aquatic Plant Treatment Systems. PCS Mapping & DTP., 97-102.

University of Florida / IFAS - Center for Aquatic and Invasive Plants, u. w. p. (Producer). (1990). *Typha domingensis, Typha latifolia*. Revisado en <http://idtools.org>

U.S. Environmental Protection Agency - EPA. (1999). Free water surface wetlands for wastewater system: A technology assessment. Arizona, EE.UU.

U.S. Environmental Protection Agency - EPA. (2000a). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial. Revisado en <http://www.epa.gov/>

U.S. Environmental Protection Agency - EPA. (2000b). Manual: Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. Ohio, EE.UU.: Office of Research and Development.

U.S. Environmental Protection Agency - EPA. (2004). Constructed treatment wetlands. Ohio, EE.UU.: Office of Water.

- Vera, A. (2008). Evaluación de la remoción de nutrientes y materia orgánica en función del desarrollo de la macrófita *Typha domingensis* en un humedal construido., Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- Vera, A; Andrade, Ch.; Flores, E.; Núñez, M.; Cárdenas, C.; Morales E. (2010). Remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal construido en función del desarrollo de la macrófita *Typha domingensis* pers. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia.*, 33, 145-152.
- Vibrans, H. (2009). Malezas de México, Typhaceae: *Typha domingensis* Pers. (Espadaña tropical). Revisado el 26/06/15, from <http://www.conabio.gob.mx/>
- Villaroel, C. (2005). Tratamiento terciario del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Cortijo para uso agrícola con humedales construidos de flujo superficial. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Czech Republic*, 531-533.
- Ying-Fen, L.; Shung-Ren, J.; Deer-Yuan, L.; Tze-Wen, W. (2002). Remoción de nutrientes de efluentes provenientes de la acuicultura mediante el uso de un sistema de humedales artificiales ("Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system"). *Aquaculture*, 209, 169-184.

- a. Aerénquima**
Parénquima con grandes espacios intercelulares, aeríferos, que se desarrolla en plantas acuáticas o palustres.

- b. Afluente**
Agua que ingresa a un sistema de tratamiento.

- c. Alcalinidad**
Capacidad del agua para neutralizar ácidos, causada por la presencia de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos.

- d. Androceo**
Conjunto de estambres, los órganos masculinos de la flor.

- e. Bacterias aerobias**
Microorganismos unicelulares que viven y se desarrollan en medios con presencia de oxígeno.

- f. Brácteolas**
En las inflorescencias compuestas, pequeña bráctea que se inserta en la base de los pedúnculos florales.

- g. Bacterias anaerobias**
Microorganismos unicelulares que viven y se desarrollan en medios con ausencia de oxígeno.

- h. Carga hidráulica**
Es el volumen de agua aplicado por unidad superficie en un determinado periodo de tiempo. Se mide en $m^3/m^2/d$.

- i. Coliformes fecales**
Microorganismos patógenos presentes en aguas residuales domésticas, que provienen de las excretas humanas.

- j. Demanda química ambiental (DQO)**
Es la cantidad de oxígeno utilizada para oxidar químicamente la materia orgánica. Es una medida indirecta del contenido de materia orgánica presente en el agua residual.

k. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos para descomponer la materia orgánica. Es una medida indirecta del contenido de materia orgánica biodegradable en el agua residual.

l. Efluente

Agua que sale de un sistema de tratamiento.

m. Estigmas

Porción apical del estilo, generalmente papilosa y receptiva del grano de polen.

n. Eutrofización

Proceso caracterizado por el incremento excesivo de nutrientes como nitratos y fosfatos en cuerpos de agua lénticos (lagos y lagunas). Lo que favorece la proliferación de algas verdes que demandan gran cantidad de oxígeno para su descomposición, agotando el oxígeno presente, en consecuencia, mueren los organismos propios del cuerpo de agua como peces u otras especies acuáticas.

o. Ginóforo

Prolongación del receptáculo que soporta el ovario. A veces es meristemática y desarrolla mucho enterrando al ovario que desarrolla subterráneamente, es el “clavo” en el maní.

p. Glumilla

En las gramíneas, par de brácteas protectoras de una espiguilla.

q. Inflorescencia

Conjunto de flores que nacen dentro de un sistema de ramificación (ejes).

r. Macrófita

Familia de plantas acuáticas que se pueden encontrar de dos formas: flotantes sobre la superficie del cuerpo de agua o enraizadas en el sustrato, ya sea, totalmente sumergidas, parcialmente sumergidas, o con hojas flotantes-. Juegan un papel fundamental en los ecosistemas acuáticos, ya que, son productores primarios cumpliendo funciones como oxigenación del agua, depuración del agua, además de proporcionar un sustrato ideal para organismos que se desarrollan en estos medios como los insectos, anfibios, aves y peces.

Dentro de este grupo se pueden encontrar algas y vegetales vasculares como briofitos, pteropsidas y angiospermas.

s. **Metahemoglobinemia**

Es un trastorno sanguíneo caracterizado por la presencia de metahemoglobina en mayores concentraciones que la hemoglobina. La metahemoglobina es una forma de hemoglobina que no puede transportar oxígeno debido a que esta molécula ha sido reemplazada por nitrito (que se formó por acción de los microorganismos presentes en el estómago a partir del nitrato). En consecuencia, no llega suficiente oxígeno a los tejidos y órganos, que pueden conllevar a la muerte.

Entre sus síntomas se pueden incluir el dolor de cabeza, mareo, fatiga, falta de aliento, náuseas, vómitos, latidos cardíacos rápidos (taquicardia), pérdida de coordinación muscular y piel de color azul. Generalmente, ocurre en la población infantil, en bebés menores de 6 meses que ingieren agua con altos niveles de nitratos.

t. **Nitrato (NO_3^-)**

Es la especie química del nitrógeno más oxidada que se encuentra en aguas residuales. Es un parámetro importante a considerar en aguas para consumo dadas a sus graves y, ocasionalmente, fatales consecuencias sobre la población infantil.

Los nitratos pueden reducirse a nitritos en el estómago de los niños y, de esta forma, unirse a la hemoglobina ocasionando una reducción en la transferencia de oxígeno a nivel celular que se manifiesta en el color azulado de la piel, condición denominada *metahemoglobinemia* o *síndrome del bebé azul*.

u. **Nitrito (NO_2^-)**

Es un compuesto inestable fácilmente oxidado a la forma de nitrato. Se encuentra en concentraciones bajas en aguas residuales (menores a 1 mg/L) y en aguas superficiales o subterráneas (menores a 0.1 mg/L). Sin embargo, su presencia es altamente tóxica para muchos peces o especies acuáticas.

v. **Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$)**

Es una forma de nitrógeno existente en aguas residuales que se expresa tanto en ión amonio o amonio (NH_4^+) como en forma de amoníaco (NH_3), dependiendo del pH de la solución. Así, en pH mayores a 9.3 predomina el NH_3 , mientras que, en pH menores a 9.3 predomina el NH_4^+ .

w. **Nitrógeno orgánico**

Es una forma de nitrógeno asociada a la materia orgánica presente el agua residual. Posteriormente, será convertido en amonio por oxidación.

x. **Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK)**

Es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal presente en una muestra de agua residual. Es un parámetro importante porque da a conocer el nitrógeno total capaz de ser nitrificado a nitratos y/o nitritos, y posteriormente, desnitrificado a nitrógeno gaseoso. Se expresa en mg/L

Compuestos nitrogenados y fosforados presentes en el agua residual. Los compuestos nitrogenados se pueden encontrar en forma de nitrógeno amoniacal o nitrógeno orgánico, mientras que, los compuestos fosforados, en forma de ortofosfatos. En concentraciones elevadas son tóxicos para el ambiente como para la salud.

z. Ortofosfatos

Formas solubles del fósforo más comunes presentes en el agua residual. Entre ellos podemos tener a: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 , su importancia radica que en esta forma se encuentran disponibles para las plantas.

aa. Perigonio

Envoltura floral donde no se puede diferenciar cáliz de corola, es decir, las piezas de la envoltura floral en dos ciclos son todas iguales en forma, color, etc. y se denominan tépalos.

bb. Sépalo

Cada pieza del cáliz

cc. Sistemas de pre-tratamiento

Son sistemas tratamiento de aguas residuales cuyo objetivo es remover material grueso o sólidos flotantes (de diámetros mayores), aceites y grasas, y sólidos inorgánicos como las arenas.

dd. Sistemas de tratamiento primario

Son sistemas de tratamiento de aguas residuales cuyo objetivo es remover un porcentaje de sólidos suspendidos y materia orgánica.

ee. Sólidos suspendidos totales (SST)

Es una fracción de sólidos totales retenidos en un filtro estándar de fibra de vidrio de tamaño de poros de aproximadamente $1.58 \mu\text{m}$ (filtro Whatman), medido después que ha sido secado a una temperatura de $103 - 105^\circ\text{C}$. Indica la fracción inorgánica presente en el agua residual.

ff. Sólidos suspendidos volátiles (SSV)

Son sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SST son calcinados ($500 \pm 50^\circ\text{C}$)

gg. Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Tiempo teórico promedio que permanece el agua residual en un sistema de tratamiento.

Inflorescencia racemosa con flores con pedicelos de igual largo, que parten del extremo del raquis.

ii. **Verticilo**

Más de dos órganos que nacen de un mismo punto.

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de flujo

Anexo 2: Análisis de caracterización

Anexo 3: Análisis del afluente antes de desviar el caudal

Anexo 4: Valores obtenidos durante el monitoreo del HAFSS

Anexo 5: Resultados de laboratorio de último monitoreo

Anexo 6: Fotos de la etapa de construcción del HAFSS

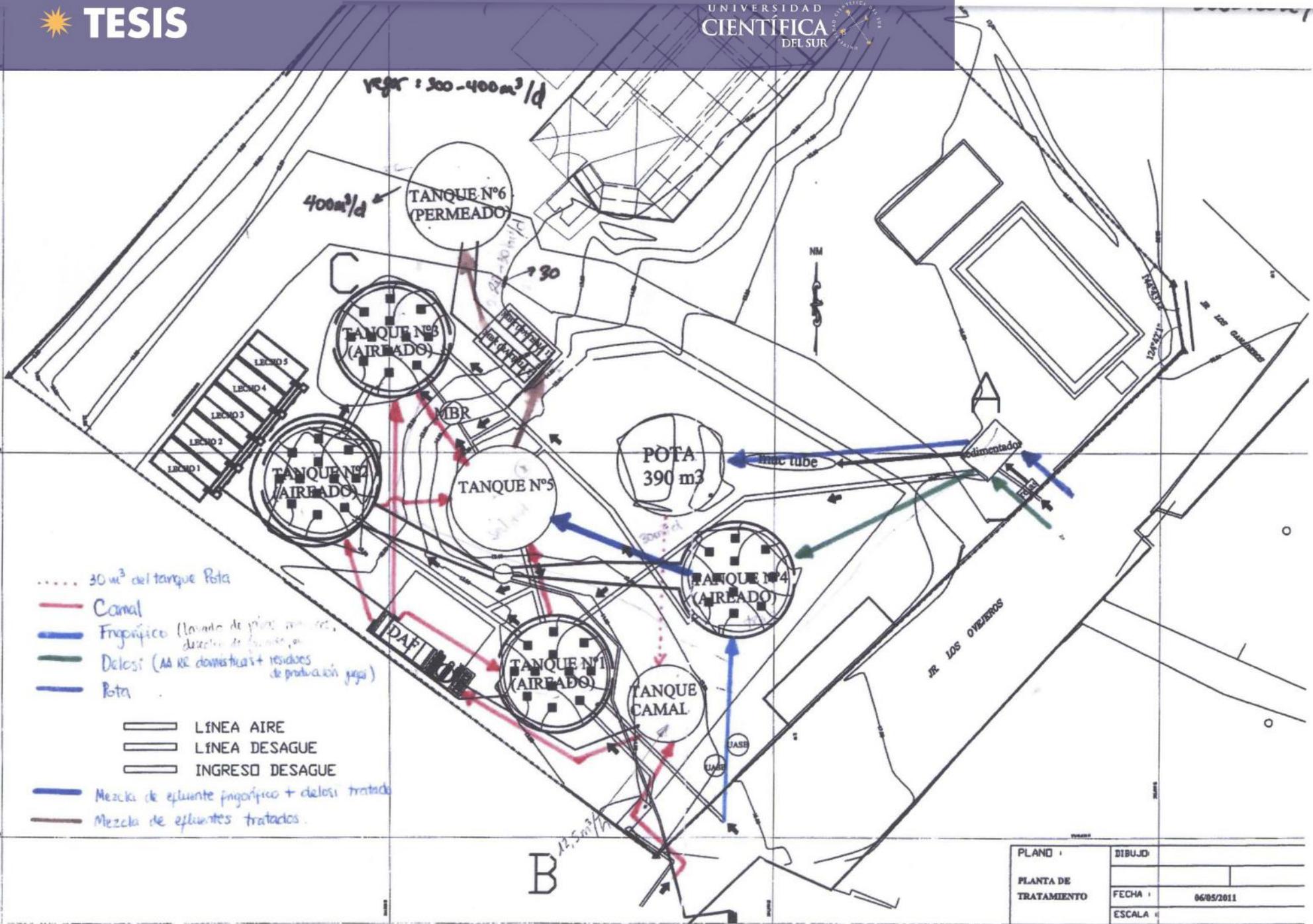
Anexo 7: Fotos de la etapa de funcionamiento del HAFSS

Anexo 8: Matriz y gráfico de altura y densidad de la totora

Anexo 9: Planos del dimensionamiento del HAFSS

ANEXO 1

Diagrama de flujo



- 30 m³ del tanque Pota
- Camal
- Frigorífico (lavado de pines, aceites, desechos de alimentos)
- Dióxido (AA RC doméstica + residuos de producción papa)
- Pota
- LÍNEA AIRE
- LÍNEA DESAGUE
- INGRESO DESAGUE
- Mezcla de efluente frigorífico + dióxido tratado
- Mezcla de efluentes tratados

PLANO 1	DIBUJO
PLANTA DE TRATAMIENTO	FECHA 06/05/2011
	ESCALA

ANEXO 2

Resultados de laboratorio del análisis de caracterización

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
SERVICIO NACIONAL DE ACREDITACIÓN
CON REGISTRO N° LE-011**



Registro N° LE-011

INFORME DE ENSAYO N° 1204463

Solicitante: **ESMERALDA CORP S.A.C.**
Domicilio Legal: Panamericana Sur Km. 18.5
Chorrillos
Tipo de Muestra: Agua de Efluente Industrial
Plan de Muestreo: ...
Solicitud de Análisis: ABR-463
Procedencia de la Muestra: Planta de Tratamiento AA.RR.
Fecha de Ingreso: 2012-04-30
Código ENVIROLAB PERU: 1204463
Referencia: Cotización 12654

Código de Lab.:	1204463-01	Fecha de Muestreo:	2012-04-30	Descripción: Tanque I	
Análisis	Método de Referencia	Límite de Cuantificación	Resultado	Unidad	Fecha de Análisis
DBO ₅	EPA 405.1	1	26	mg/L	2012-04-30
N - Amoniacal	SM 4500NH ₃ -F	0.01	248.3	mg/L	2012-05-10
N - Nitrato	EPA 352.1	0.05	0.23	mg/L	2012-05-07
Sólidos Totales en Suspensión	SM 2540-D	1	8	mg/L	2012-05-05
◆ Sólidos Totales Volátiles en Suspensión	SM 2540-E	1	5	mg/L	2012-05-06
*Coliformes Termotolerantes	SM 9221 E.1	...	13	NMP/100mL	2012-04-30
*Coliformes Totales	SM 9221 B	...	79	NMP/100mL	2012-04-30
◆*Nitrógeno Orgánico	SM 4500 NH ₃ C	0.10	9.07	mg/L	2012-05-09
Fósforo Total	EPA 200.7	0.01	19.77	mg/L	2012-05-10

N.D. Significa No Detectable al nivel de cuantificación indicado.

Condición y Estado de la Muestra Ensayada:

La muestra llegó preservada al Laboratorio.

Nota:

La fecha de muestreo es dato proporcionado por el Cliente.

LUIS BUENO CARBAJAL
Gerente General
C.I.P. N° 6618



Lima, Perú,

2012-05-14

ENRIQUE QUEVEDO BACIGALUPO
Jefe de Laboratorio

Nota: -Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada.

◆ Los métodos en la matriz indicada no han sido acreditados por el SNA.

* Los métodos subcontratados en la matriz indicada, son acreditados por el SNA.

◆* Los métodos subcontratados en la matriz indicada, no han sido acreditados por el SNA.

-Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto.

-Dependiendo del parámetro a ser analizado las muestras tendrán un tiempo de custodia máximo de 7 días calendario después de entregado

el Informe de Ensayo

Tesis publicadas con autorización del autor.

No olvide citar esta tesis. Av. La Marina 3059 San Miguel - Lima 32 PERU

INFORME DE ENSAYO

N° 1204463

MÉTODOS DE ENSAYO

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO/DBO Soluble)	EPA METHOD 405.1 600/4-79-020 Revised March 1983 Biochemical Oxygen Demand (5 Days, 20°C)
N-Amoniaco	SM METHOD 4500-NH3-F. APHA,AWWA,WEF 21st Ed 2005 Phenate Method
N-Nitrato	EPA METHOD 352.1 600/4-79-020 Revised March 1983 Nitrogen, Nitrate (Colorimetric Brucine)
Sólidos Totales en Suspensión	SM METHOD 2540-D APHA,AWWA,WEF 21st Ed 2005 Total Suspended Solids Dried at 103 - 105°C
Sólidos Totales Volátiles en Suspensión	SM 2540 E Fixed and Volatile Ignited at 550°C. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA, WEF 21st Ed 2005.
Nitrógeno Orgánico	SM 4500 NH ₃ - C "Titrimetric Method". Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA, WEF 21st Ed 2005.
Fósforo Total:	EPA METHOD 365.3 600/4-79-020 Revised March 1983 Phosphorus, All Forms (Colorimetric, Ascorbic Acid two Reagent)


LUIS BUENO CARBAJAL
Gerente General
C.I.P. N° 6618
Lima, Perú,



2012-05-14


ENRIQUE QUEVEDO BACIGALUPO
Jefe de Laboratorio

ANEXO 3

Resultados de laboratorio del análisis del afluyente previo a funcionamiento del HAFSS

INFORME DE ENSAYO N° 08264-2014 CON VALOR OFICIAL

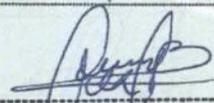
RAZÓN SOCIAL : ESMERALDA CORP S.A.C
DOMICILIO LEGAL : AV. AUTOP. PANAMERICANA SUR KM. 18.5 MZA. G, LOTE 01-B Z.I. LA CONCORDIA
SAN JUAN DE MIRAFLORES
SOLICITADO POR : ING. LIDIA ZEVALLOS
REFERENCIA : CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL TRATADA - PTAR
PROCEDENCIA : SAN JUAN DE MIRAFLORES
FECHA DE RECEPCIÓN : 2014-01-20
FECHA DE INICIO DE ENSAYOS : 2014-01-20
MUESTREADO POR : SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.⁽¹⁾

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C.	Unidades
Aceites y grasas (HEM)	EPA-821-R-10-001 Method 1664 Rev. B. N-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated N-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non-polar Material) by Extraction and Gravimetry. 2010	1.00	mg/L
Alcalinidad (al carbonato, bicarbonato)	SM 2320 B. Alkalinity. Titration Method.	1.00	CaCO ₃ mg / L
Cloruros	SM-4500-Cl ⁻ B. Chloride. Argentometric Method.	1.00	Cl ⁻ mg / L
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	SM 5210 B. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.	2.0	mg/L
Demanda Química de oxígeno (DQO)	SM 5220 D. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.	10.0	mg/L
Calcio (Dureza cálcica)	SM 3500-Ca B. Calcium. EDTA Titrimetric Method.	1.00	CaCO ₃ mg/L
Fenoles	EPA-SW-846, Method-9065. Phenolics (Spectrophotometric Manual 4-AAP with distillation). 1986	0.001	mg/L
Fluoruros (F ⁻)	SM 4500-F- B, D. Fluoride. SPADNS. 2012	0.10	F ⁻ mg/L
Fosfatos (PO ₄ ⁻³)	SM 4500-P E. Phosphorus. Ascorbic Acid Method.	0.030	PO ₄ ⁻³ mg/L
Nitratos	SM 4500-NO ₃ ⁻ E. Nitrogen (Nitrate). Cadmium Reduction Method.	0.03	NO ₃ ⁻ - N mg/L
Nitritos	SM 4500-NO ₂ ⁻ B. Nitrogen (Nitrite). Colorimetric Method.	0.003	NO ₂ ⁻ - N mg/L
SAAM (Detergentes)	SM 5540 C. Surfactants. Anionic Surfactants as MBAS.	0.025	mg / L
Sulfatos	SM 4500 SO ₄ ²⁻ E. Sulfate. Turbidimetric Method.	1.00	SO ₄ ²⁻ mg/L
Sulfuros	SM 4500 S ²⁻ D. Sulfide. Methylene Blue Method.	0.002	S ²⁻ mg/L
Conductividad (medición en campo)	SM 2510 B. Conductivity. Laboratory Method.	1.0	µS/cm
Oxígeno Disuelto OD (medición en campo)	SM 4500-O G. Oxygen (Dissolved). Membrane Electrode Method. 2012	0.47	O ₂ mg / L
pH (medición en campo)	SM 4500 H ⁺ B. pH Value. Electrometric Method	---	Unid. pH
Temperatura (medición en campo)	SM 2550 B. Temperature. Laboratory and Field Methods.	---	°C
*Pesticidas Organoclorados (POCl)	EPA Method 8270D, Rev 4. Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). 2007	---	ug/L
*Pesticidas organofosforados (POF)	EPA Method 8270D, Rev 4. Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). 2007	---	ug/L
*Carbamato (Aldicarb)	EPA Method 8270D, Rev 4. Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). 2007	0.03	ug/L

L.C.: Límite de cuantificación.

(1) Toma de muestra de acuerdo a plan de muestreo N° 08264 y procedimiento PL-009.



Quím. Belbeth Fajardo León
C.Q.P. 648
JEFE DE EMISIÓN DE INFORMES
SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

*El método indicado no ha sido acreditado por INDECOPI/SNA

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (SMEWW)-APHA-AWWA-WEF 22nd Edition 2012. - EPA: U.S. Environmental Protection Agency - ASTM: American Society for Testing and Materials - NTP: Norma Técnica Peruana
OBSERVACIONES: Esta provisto la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S. A. C.. Solo es válido para las muestras referidas en el presente informe. Las muestras serán conservadas de acuerdo al periodo de preservación del parámetro analizado con un máximo de 30 días calendario de haber ingresado la muestra al laboratorio

NOTA: Los resultados de los ensayos se emiten de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Tesis publicadas con autorización del autor

No olvide citar esta tesis.

Página 1 de 6

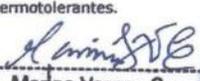
INFORME DE ENSAYO N° 08264-2014 CON VALOR OFICIAL

II. RESULTADOS:

Producto declarado		Agua Residual tratada	Agua Residual tratada	Blanco
Matriz analizada		Agua Residual	Agua Residual	----
Fecha de muestreo		2014-01-20	2014-01-20	----
Hora de inicio de muestreo (h)		12:10	12:10	----
Coordenadas UTM WGS 84		0284682E	0284682E	----
		8649378N	8649378N	----
Altitud (msnm)		28	28	----
Descripción del punto de muestreo		Batería 3 de la planta de tratamiento de aguas residuales	Batería 3 de la planta de tratamiento de aguas residuales	----
Condiciones de la muestra		Refrigerada y preservada	Refrigerada y preservada	Refrigerada y preservada
Código del Cliente		Batería 3	DUPLICADO (Batería 3)	BK (Blanco)
Código del Laboratorio		1401778	1401779	1401780
Ensayos	Unidades	Resultados		
Aceites y grasas (HEM)	mg/L	<1.00	////	////
Alcalinidad (al carbonato)	CaCO ₃ mg / L	<1.00	////	////
Alcalinidad (al bicarbonato)	CaCO ₃ mg / L	313.87	////	////
Cloruros	Cl ⁻ mg / L	1102	////	////
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	8.58	////	////
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L	19.50	////	////
Calcio (Dureza cálcica)	CaCO ₃ mg/L	239.8	////	////
Fenoles	mg/L	<0.001	////	////
Fluoruros (F ⁻)	F mg/L	0.501	////	////
Fosfatos (PO ₄ ⁻³)	PO ₄ ⁻³ mg/L	24.579	////	////
Nitratos	NO ₃ ⁻ - N mg/L	4.818	////	////
Nitritos	NO ₂ ⁻ - N mg/L	6.094	////	////
SAAM (Detergentes)	mg / L	0.128	////	////
Sulfatos	SO ₄ ⁻² mg/L	626.25	////	<1.00
Sulfuros	S ⁻² mg/L	<0.002	<0.002	////
Conductividad (medición en campo)	µS/cm	5210	////	////
Oxígeno Disuelto OD (medición en campo)	O ₂ mg / L	1.37	////	////
pH (medición en campo)	Unid. pH	7.48	////	////
Temperatura (medición en campo)	° C	25.8	////	////
Detección de <i>Salmonella</i> sp.	A/P/2L	Ausencia	////	////
Numeración de <i>Escherichia coli</i>	NMP /100mL	<1.8	////	////
Numeración de Coliformes Fecales ⁽²⁾	NMP /100mL	<1.8	<1.8	////
Numeración de Coliformes Totales	NMP /100mL	13	17	////
Numeración de Enterococos fecales	NMP/100mL	<1.8	////	////
Vibrio cholerae	A/P/100mL	Ausencia	////	////

Medición de conductividad y pH realizada a 25°C.

(2) Coliformes Fecales es lo mismo que coliformes termotolerantes.


Biga. Marina Vargas Cornejo
JEFE DE LABORATORIO MICROBIOLÓGICO
C.B.P. N° 10135
SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.


Quim. Belbeth Fajardo León
C.O.P. 648
JEFE DE EMISIÓN DE INFORMES
SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

* El método indicado no ha sido acreditado por INDECOPI/SNA

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (SMEWW)-APHA-AWWA-WEF, 22nd Edition 2012 - EPA: U.S. Environmental Protection Agency - ASTM: American Society for Testing and Materials - NTP: Norma Técnica Peruana
OBSERVACIONES: Esta prestación de la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. Solo es válido para las muestras referidas en el presente informe.
Las muestras serán conservadas de acuerdo al periodo de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días calendario de haber ingresado la muestra al laboratorio.

NOTA: Este informe es una declaración de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Página 3 de 6

Tesis publicadas con autorización del autor.
No olvide citar esta tesis.

ANEXO 4

Valores obtenidos durante el monitoreo al HAFSS

ANEXO 4a

Matriz de valores registrados para cada parámetro analizado

Análisis	Unidad	Muestra				Rendimiento (%)
		Afluente		Efluente		
		Fecha de análisis de muestra	Valor	Fecha de análisis de muestra	Valor	
Temperatura	°C	30/11/2013				
		21/12/2013		28/12/2013		
		28/12/2013		04/01/2014		
		04/01/2014				
				08/03/2014		
		08/03/2014	25.5	18/03/2014	25.6	
		18/03/2014	23.7	22/03/2014	23.5	
		22/03/2014	26.8	29/03/14 (*)	26.9	
		29/03/2014	24.9	05/04/2014	25	
		05/04/2014	25.8	12/04/2014	25.7	
		12/04/2014	24.8	19/04/2014	24.8	
		19/04/2014	23.5	30/04/2014	23.5	
		30/04/2014		03/05/2014		
		03/05/2014		10/05/2014		
		10/05/2014		17/05/2014		
		17/05/2014	26.4	31/05/2014	26.5	
		31/05/2014	25.5	07/06/2014	25.5	
		07/06/2014		14/06/2014		
		14/06/2014		21/06/2014		
		21/06/2014	21.7	28/06/2014	21.9	
		28/06/2014	21.5	05/07/2014	21.3	
		05/07/2014	19.9	12/07/2014	19.8	
		12/07/2014	19.4	19/07/2014	19.5	
		19/07/2014	19.7	26/07/2014	19.5	
		26/07/2014	17.5	02/08/2014	17.6	
		02/08/2014	18.5	09/08/2014	18.4	
		09/08/2014	17.3	16/08/2014	17.2	
		16/08/2014	16.9	23/08/2014	16.5	
		23/08/2014	19	30/08/2014	19	
		30/08/2014	18.2	06/09/2014	18.2	
pH	-	30/11/2013	8.03			
		21/12/2013	7.90	28/12/2013	6.66	
		28/12/2013	7.31	04/01/2014	7.28	
		04/01/2014	7.38			
				08/03/2014	6.97	
		08/03/2014	6.82	18/03/2014	6.94	
		18/03/2014	7.08	22/03/2014	7.30	
		22/03/2014	7.23	29/03/14 (*)	7.41	
		29/03/2014	7.32	05/04/2014	7.32	
		05/04/2014	7.27	12/04/2014	7.35	
		12/04/2014	7.42	19/04/2014	7.87	
		19/04/2014	8.08	30/04/2014	7.95	
		30/04/2014	8.01	03/05/2014	7.92	
		03/05/2014	7.98	10/05/2014	8.04	
		10/05/2014	8.05	17/05/2014	8.01	
		17/05/2014	7.10	31/05/2014	7.05	
		31/05/2014	7.86	07/06/2014	7.85	
		07/06/2014	8.06	14/06/2014	7.75	
		14/06/2014	7.97	21/06/2014	7.43	
		21/06/2014	7.82	28/06/2014	7.21	
		28/06/2014	7.84	05/07/2014	7.60	
		05/07/2014	7.79	12/07/2014	6.82	
		12/07/2014	7.76	19/07/2014	7.26	
		19/07/2014	7.87	26/07/2014	7.10	
		26/07/2014	7.89	02/08/2014	7.92	
		02/08/2014	7.72	09/08/2014	7.90	
		09/08/2014	8.01	16/08/2014	7.56	
		16/08/2014	7.61	23/08/2014	6.98	
		23/08/2014	7.81	30/08/2014	6.99	
		30/08/2014	7.69	06/09/2014	7.55	
06/09/2014	7.75	13/09/2014	7.68			

		30/11/2013	0.894			
		21/12/2013	0.977	28/12/2013	1.13	
		28/12/2013	2.33	04/01/2014	3.52	
		04/01/2014	2.65			
				08/03/2014	0.74	
		08/03/2014	3.42	18/03/2014	2.68	
		18/03/2014	2.82	22/03/2014	1.91	
		22/03/2014	2.06	29/03/14 (*)	12.90	
		29/03/2014	3.51	05/04/2014	5.39	
		05/04/2014	2.66	12/04/2014	1.5	
		12/04/2014	0.6	19/04/2014	0.22	
		19/04/2014	1.65	03/05/2014	1.21	
		03/05/2014	2.28	10/05/2014	5.76	
		10/05/2014	6.97	17/05/2014	4.20	
		17/05/2014	5.12	31/05/2014	3.56	
		31/05/2014	3.2	07/06/2014	1.56	
		07/06/2014	2.08	14/06/2014	1.65	
		14/06/2014	1.69	21/06/2014	1.45	
		21/06/2014	5.74	28/06/2014	4.19	
		28/06/2014	5.96	05/07/2014	1.18	
		05/07/2014	2.50	12/07/2014	1.60	
		12/07/2014	2.01	19/07/2014	1.06	
		19/07/2014	3.57	26/07/2014	1.73	
		26/07/2014	4.99	02/08/2014	1.92	
		02/08/2014	2.21	09/08/2014	0.95	
		09/08/2014	3.79	16/08/2014	1.65	
		16/08/2014	2.47	23/08/2014	1.08	
		23/08/2014	4.26	30/08/2014	1.06	
		30/08/2014	5.10	06/09/2014	1.09	
		06/09/2014	3.2	13/09/2014	0.5	
		30/11/2013	23			
		21/12/2013	260	28/12/2013	60	76.9
		28/12/2013	86	04/01/2014		
		04/01/2014				
				08/03/2014	118	
		08/03/2014	92	18/03/2014	96	-4
		18/03/2014	60	22/03/2014	40	33
		22/03/2014	54	29/03/14 (*)	88	-63
		29/03/2014	80	05/04/2014	50	37.5
		05/04/2014	54	12/04/2014	50	7.4
		12/04/2014	59	19/04/2014	54	8.5
		19/04/2014	78	30/04/2014	70	10.3
		30/04/2014	96	03/05/2014	80	17
		03/05/2014	91	10/05/2014	68	25.3
		10/05/2014	150	17/05/2014	105	30
		17/05/2014	120	31/05/2014	58	51.7
		31/05/2014	82	07/06/2014	42	48.8
		07/06/2014	43	14/06/2014	28.5	33.7
		14/06/2014	60	21/06/2014	35	41.7
		21/06/2014	81	28/06/2014	45	44.4
		28/06/2014	92	05/07/2014	51.5	44
		05/07/2014	150.3	12/07/2014	80	46.8
		12/07/2014	90	19/07/2014	45.5	49.4
		19/07/2014	59.5	26/07/2014	28.5	52.1
		26/07/2014	65	02/08/2014	24	63.1
		02/08/2014	130	09/08/2014	43	66.9
		09/08/2014	350	16/08/2014	81	76.9
		16/08/2014	250	23/08/2014	35	86
		23/08/2014	210	30/08/2014	27.5	86.9
		30/08/2014	125	06/09/2014	15.5	87.60
		06/09/2014	575	13/09/2014	70.2	87.79

Nitrógeno	N- amoniacoal	mg/L	30/11/2013	30.4			
			21/12/2013	316	28/12/2013	74	76.6
			28/12/2013	104	04/01/2014		
			04/01/2014				
					08/03/2014	144	
			08/03/2014	112	18/03/2014	24.5	78.1
			18/03/2014	23	22/03/2014	176	-665.2
			22/03/2014	242	29/03/14 (*)	106	56.2
			29/03/2014	96	05/04/2014	60	37.5
			05/04/2014	66	12/04/2014	61	7.6
			12/04/2014	72	19/04/2014	66	8.3
			19/04/2014	94	30/04/2014	85.4	9
			30/04/2014	117	03/05/2014	98	16
			03/05/2014	111	10/05/2014	83	25.2
			10/05/2014	182	17/05/2014	145.2	20.2
			17/05/2014	127.1	31/05/2014	70	44.9
			31/05/2014	100	07/06/2014	50	50
			07/06/2014	52	14/06/2014	34.8	33.1
			14/06/2014	72	21/06/2014	42	41.7
			21/06/2014	98	28/06/2014	54.9	44
			28/06/2014	111	05/07/2014	62.8	43.4
			05/07/2014	165	12/07/2014	97.6	40.8
			12/07/2014	90	19/07/2014	55.5	38.3
			19/07/2014	72	26/07/2014	34.8	51.7
			26/07/2014	77.5	02/08/2014	29.3	62.2
			02/08/2014	154.7	09/08/2014	52	66.4
			09/08/2014	408.3	16/08/2014	98	76
	16/08/2014	302.5	23/08/2014	42.5	86		
	23/08/2014	255	30/08/2014	32.5	87.3		
	30/08/2014	152.5	06/09/2014	18.6	87.8		
	06/09/2014	690.0	13/09/2014	69.9	90		
	Nitratos (NO ₃)	mg/L	30/11/2013	110.7			
			21/12/2013	1148	28/12/2013	266	76.8
			28/12/2013	380	04/01/2014		
			04/01/2014				
					08/03/2014	522	
			08/03/2014	410	18/03/2014	11.9	97.1
			18/03/2014	22.26	22/03/2014	48	-115.6
			22/03/2014	66	29/03/14 (*)	386	-484.8
			29/03/2014	350	05/04/2014	218	37.7
			05/04/2014	238	12/04/2014	222	6.7
			12/04/2014	262	19/04/2014	240	8.4
			19/04/2014	344	30/04/2014	310.8	9.7
			30/04/2014	425	03/05/2014	355	16
			03/05/2014	403	10/05/2014	302	25.1
			10/05/2014	664	17/05/2014	532.8	19.8
			17/05/2014	466.2	31/05/2014	256	45.1
31/05/2014			366	07/06/2014	184	49.7	
07/06/2014			191	14/06/2014	126.5	33.8	
14/06/2014			266	21/06/2014	155	41.7	
21/06/2014			360	28/06/2014	199.8	44.5	
28/06/2014			408.5	05/07/2014	228.7	44	
05/07/2014			667	12/07/2014	355.2	46.7	
12/07/2014			400	19/07/2014	202	49.5	
19/07/2014			264	26/07/2014	126.5	52.1	
26/07/2014			285	02/08/2014	106.6	62.6	
02/08/2014			577.2	09/08/2014	190.9	66.9	
09/08/2014			1515.5	16/08/2014	359.6	76.3	
16/08/2014			1110	23/08/2014	155	86	
23/08/2014			930	30/08/2014	120	87.1	
30/08/2014			554	06/09/2014	68.7	87.6	
06/09/2014	2545	13/09/2014	10	99.6			

Fósforo	Fósforo total (Pt)	mg/L	30/11/2013	1.15					
			21/12/2013	9.4	28/12/2013	5.2	44.7		
			28/12/2013	6	04/01/2014	4	33.3		
			04/01/2014	5.4					
					08/03/2014	4.6			
			08/03/2014	6.8	18/03/2014	7.2	-6		
			18/03/2014	2	22/03/2014	1.6	20		
			22/03/2014	2.6	29/03/14 (*)	5.2	-100		
			29/03/2014	6	05/04/2014	5.2	13.3		
			05/04/2014	5	12/04/2014	4.1	18		
			12/04/2014	11	19/04/2014	8.2	25.5		
			19/04/2014	8.4	30/04/2014	5.6	33.3		
			30/04/2014	8	03/05/2014	6.9	13.8		
			03/05/2014	8.1	10/05/2014	7.2	11.1		
			10/05/2014	8.5	17/05/2014	7.1	16.5		
			17/05/2014	9.2	31/05/2014	7.5	18.5		
			31/05/2014	8.1	07/06/2014	4.5	44.4		
			07/06/2014	10	14/06/2014	5.5	45		
			14/06/2014	9.8	21/06/2014	5	49		
			21/06/2014	15.5	28/06/2014	7.5	51.6		
			28/06/2014	12.5	05/07/2014	4.3	65.6		
			05/07/2014	12	12/07/2014	3.8	68.3		
			12/07/2014	4.5	19/07/2014	1.4	69		
			19/07/2014	7.5	26/07/2014	2.2	71		
			26/07/2014	6	02/08/2014	1.6	73.3		
			02/08/2014	4.5	09/08/2014	1.1	75.6		
			09/08/2014	10.3	16/08/2014	2.1	79.6		
			16/08/2014	11.5	23/08/2014	2.3	80		
			23/08/2014	10.3	30/08/2014	1.75	83		
			30/08/2014	9.5	06/09/2014	1.2	87.4		
			06/09/2014	6	13/09/2014	0.3	95		
					30/11/2013	3.53			
					21/12/2013	28.6	28/12/2013	16	44.1
					28/12/2013	18.2	04/01/2014	12.4	31.9
					04/01/2014	16.4			
				08/03/2014	13.8				
		08/03/2014	20.6	18/03/2014	9.05	56.1			
		18/03/2014	8.65	22/03/2014	4.8	44.5			
		22/03/2014	7.8	29/03/14 (*)	16.2	-107.7			
		29/03/2014	18.2	05/04/2014	15.2	16.5			
		05/04/2014	15.8	12/04/2014	12.71	19.6			
		12/04/2014	34.1	19/04/2014	25	26.7			
		19/04/2014	26	30/04/2014	16.8	35.4			
		30/04/2014	24.6	03/05/2014	21.2	13.8			
		03/05/2014	25	10/05/2014	22.1	11.6			
		10/05/2014	26.1	17/05/2014	21.8	16.5			
		17/05/2014	28.2	31/05/2014	16.7	40.8			
		31/05/2014	18.3	07/06/2014	13.9	24.0			
		07/06/2014	30.5	14/06/2014	17	44.3			
		14/06/2014	30.4	21/06/2014	15.5	49			
		21/06/2014	48.1	28/06/2014	23.3	51.6			
		28/06/2014	38.8	05/07/2014	12.9	66.8			
		05/07/2014	37.4	12/07/2014	11.8	68.4			
		12/07/2014	13.8	19/07/2014	4.3	68.8			
		19/07/2014	23.3	26/07/2014	6.8	70.8			
		26/07/2014	18.6	02/08/2014	5	73.1			
		02/08/2014	13.8	09/08/2014	3.4	75.4			
		09/08/2014	31	16/08/2014	6.5	79			
		16/08/2014	35.7	23/08/2014	7.1	80.1			
		23/08/2014	31.5	30/08/2014	5.4	82.9			
		30/08/2014	29.5	06/09/2014	3.72	87.4			
		06/09/2014	18.6	13/09/2014	0.11	99.4			

		30/11/2013	2.63		
		21/12/2013	21.4	28/12/2013	12
		28/12/2013	13.6	04/01/2014	9.2
		04/01/2014	12.2		
				08.03.14	10.4
		08/03/2014	15.4	18/03/2014	21
		18/03/2014	5	22/03/2014	3.6
		22/03/2014	5.8	29/03/14 (*)	7
		29/03/2014	13.6	05/04/2014	11.4
		05/04/2014	11.8	12/04/2014	9.4
		12/04/2014	25.3	19/04/2014	18.8
		19/04/2014	19.4	30/04/2014	12.4
		30/04/2014	18.4	03/05/2014	15.8
		03/05/2014	18.7	10/05/2014	16.5
		10/05/2014	19.4	17/05/2014	16.2
		17/05/2014	21.1	31/05/2014	14.8
		31/05/2014	15.6	07/06/2014	10.4
		07/06/2014	22.8	14/06/2014	12.7
		14/06/2014	22.5	21/06/2014	11.5
		21/06/2014	35.7	28/06/2014	17.3
		28/06/2014	28.8	05/07/2014	9.7
		05/07/2014	27.5	12/07/2014	8.7
		12/07/2014	10.3	19/07/2014	3.2
		19/07/2014	17.3	26/07/2014	5.1
		26/07/2014	13.8	02/08/2014	3.7
		02/08/2014	10.3	09/08/2014	2.5
		09/08/2014	23.3	16/08/2014	4.8
		16/08/2014	26.5	23/08/2014	5.3
		23/08/2014	23.5	30/08/2014	4
		30/08/2014	21.9	06/09/2014	2.8
		06/09/2014	13.8	13/09/2014	0.78

Nota

(*) Problema de turbidez en el tanque final

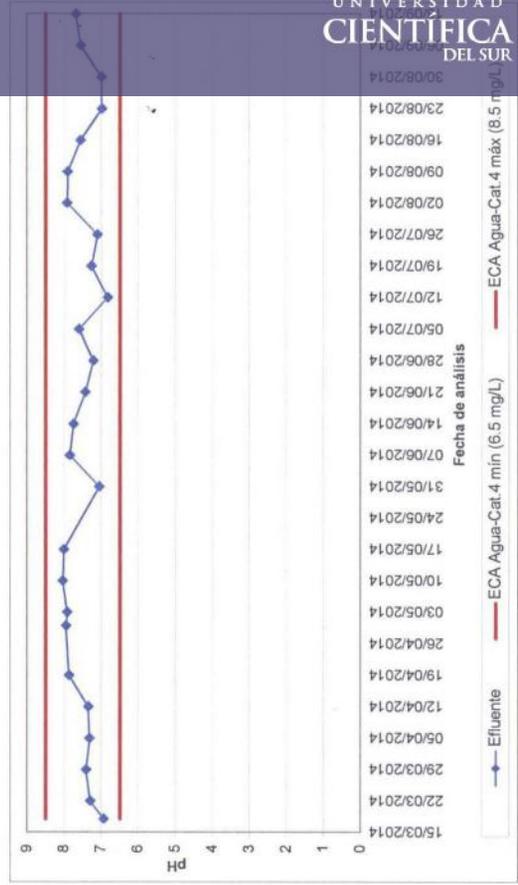
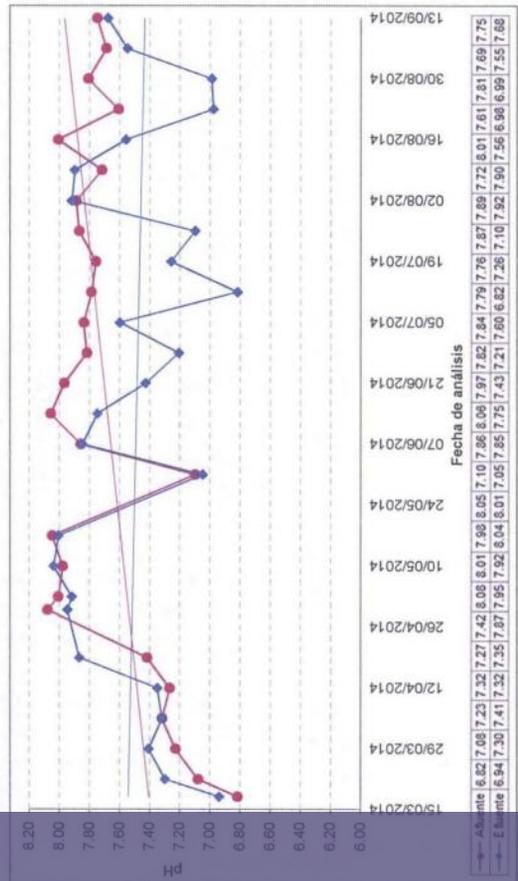
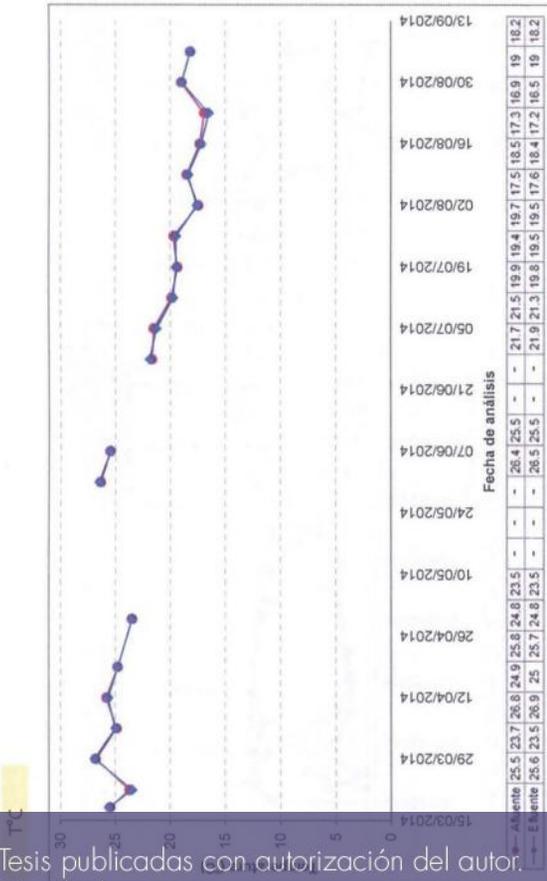
Podas

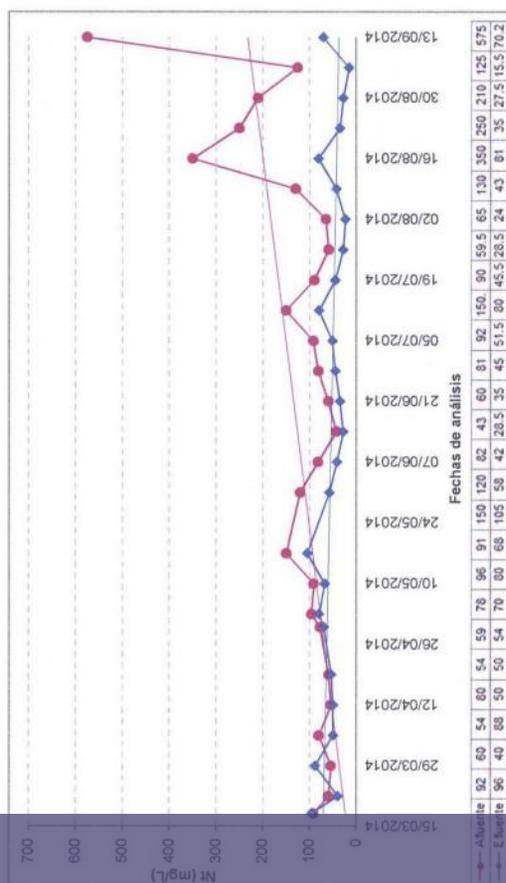
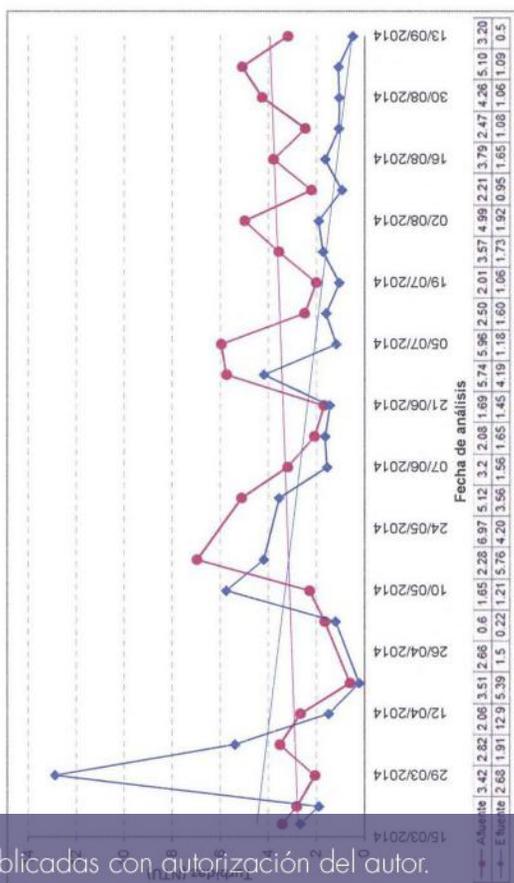
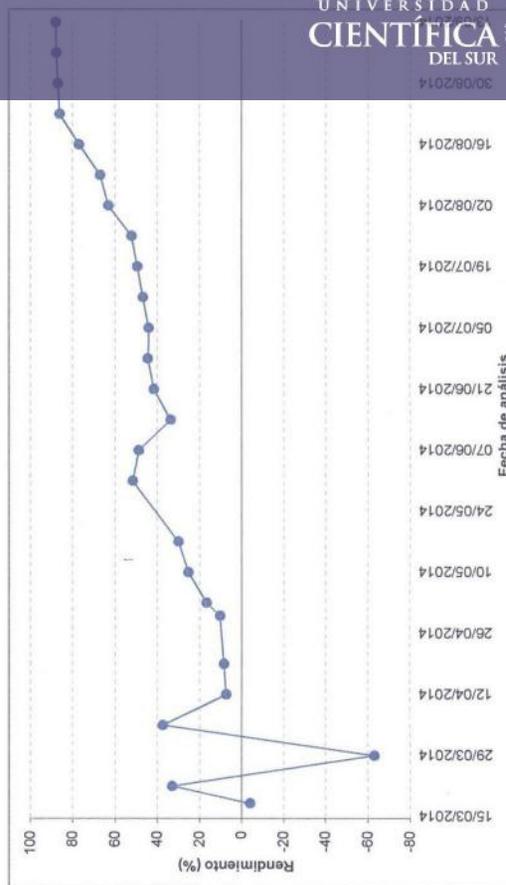
1° poda: 06/07/14

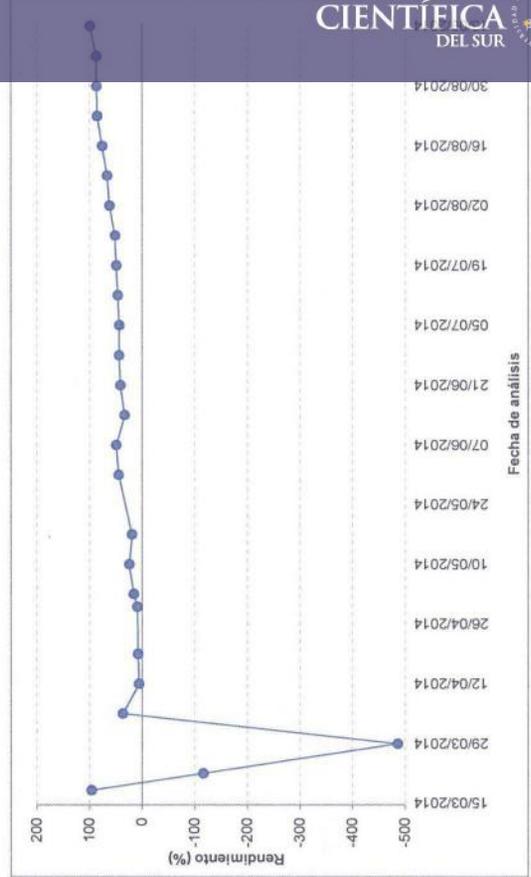
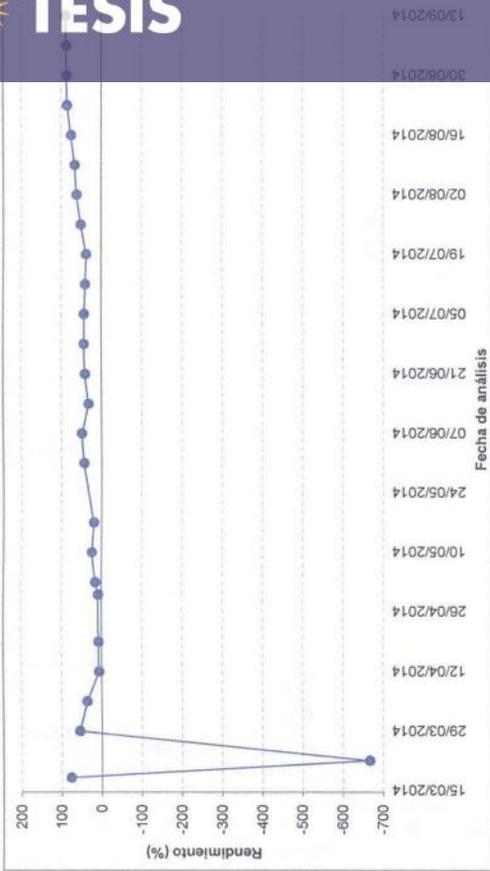
2° poda: 12/07/14

ANEXO 4b

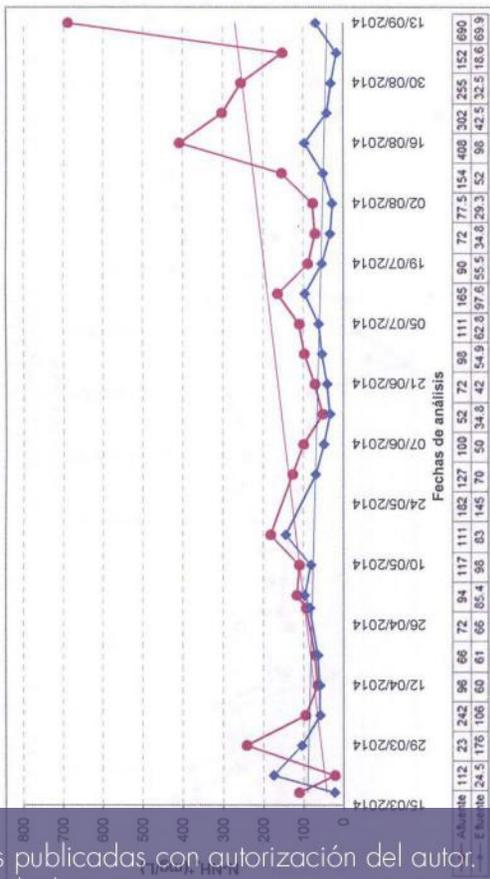
Gráficos de parámetros analizados



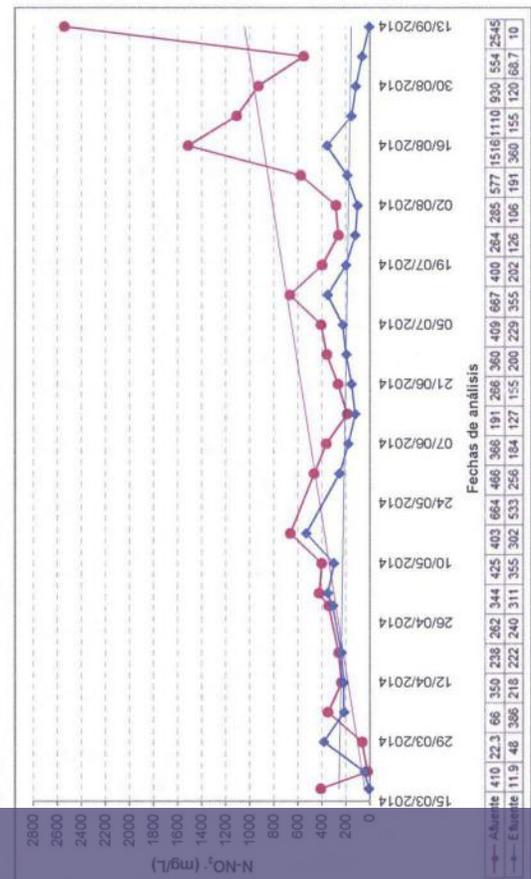


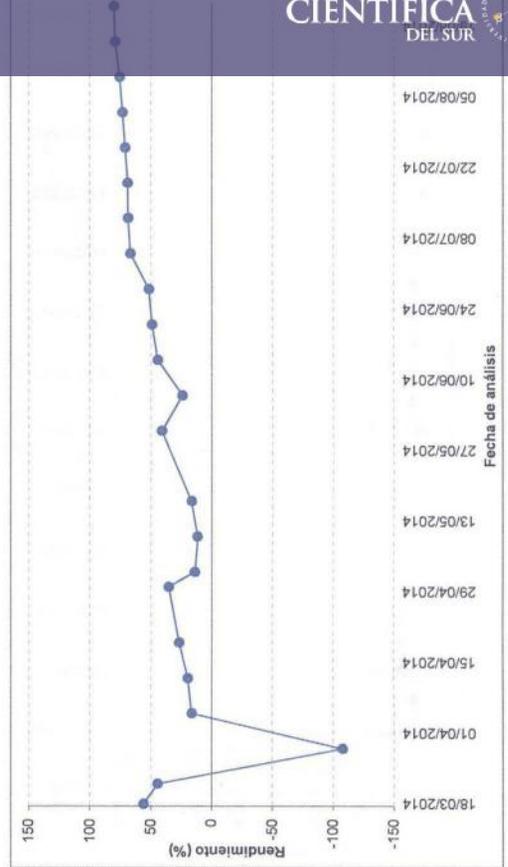
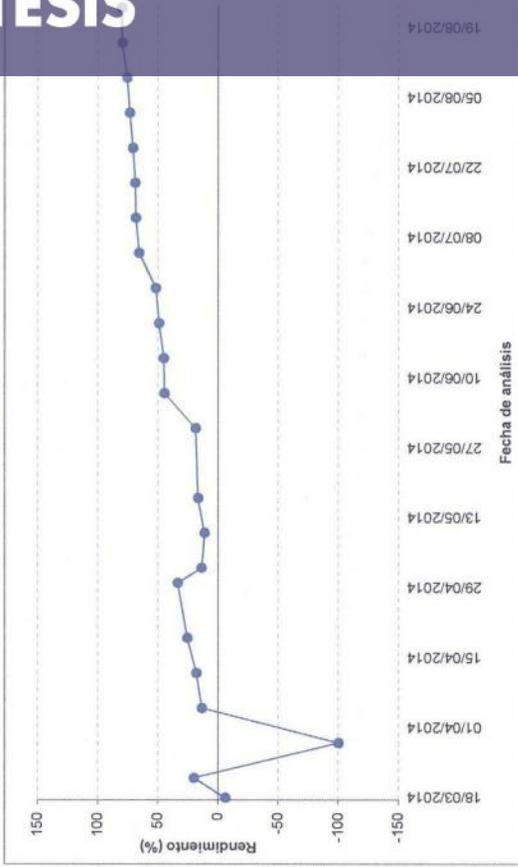


N-amoniaco

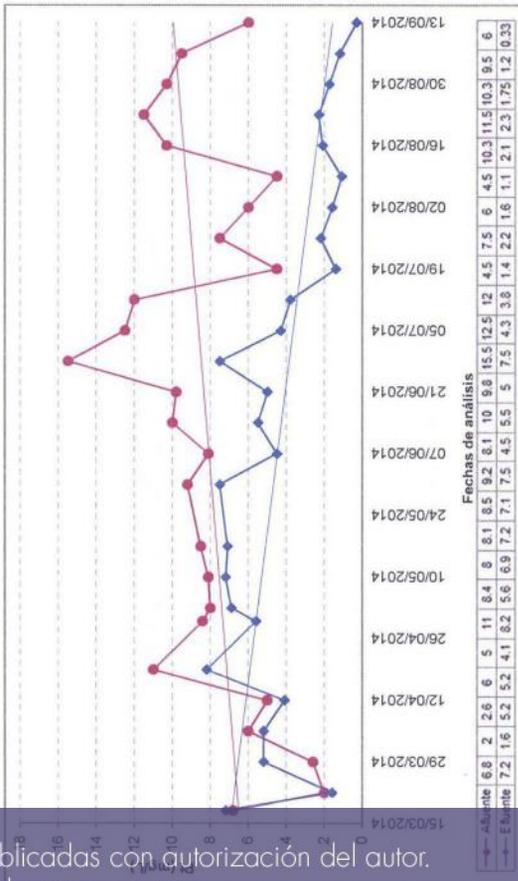


Nitratos (NO₃⁻)

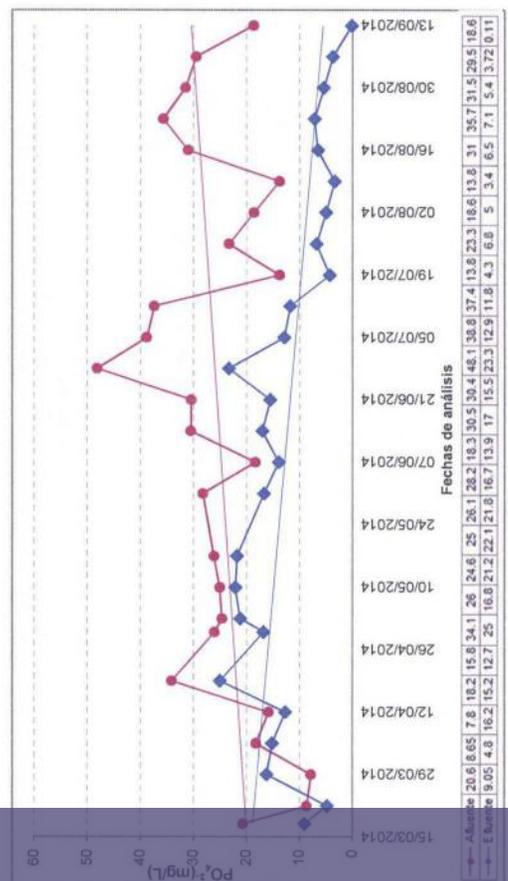


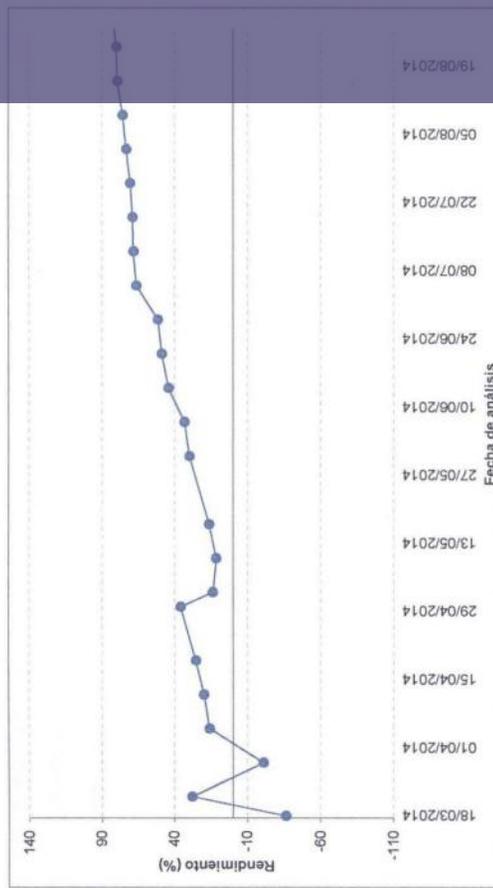


Fósforo total

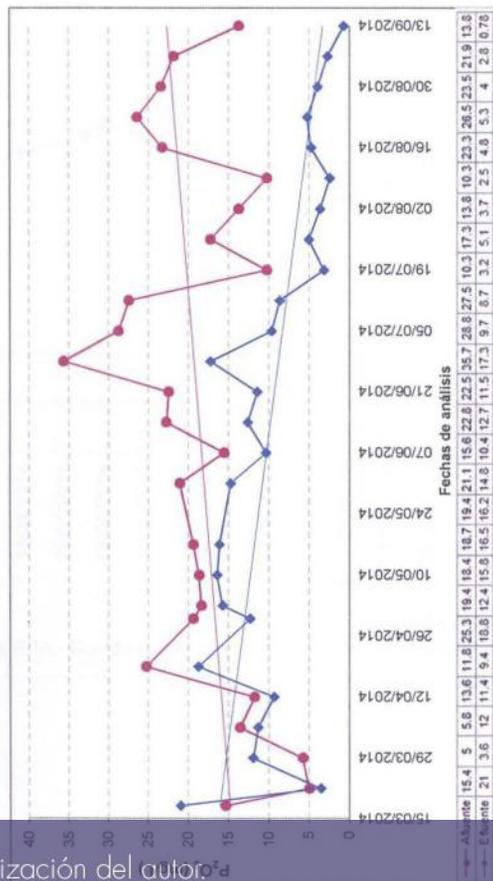


Ortófosfato (PO₄³⁻)

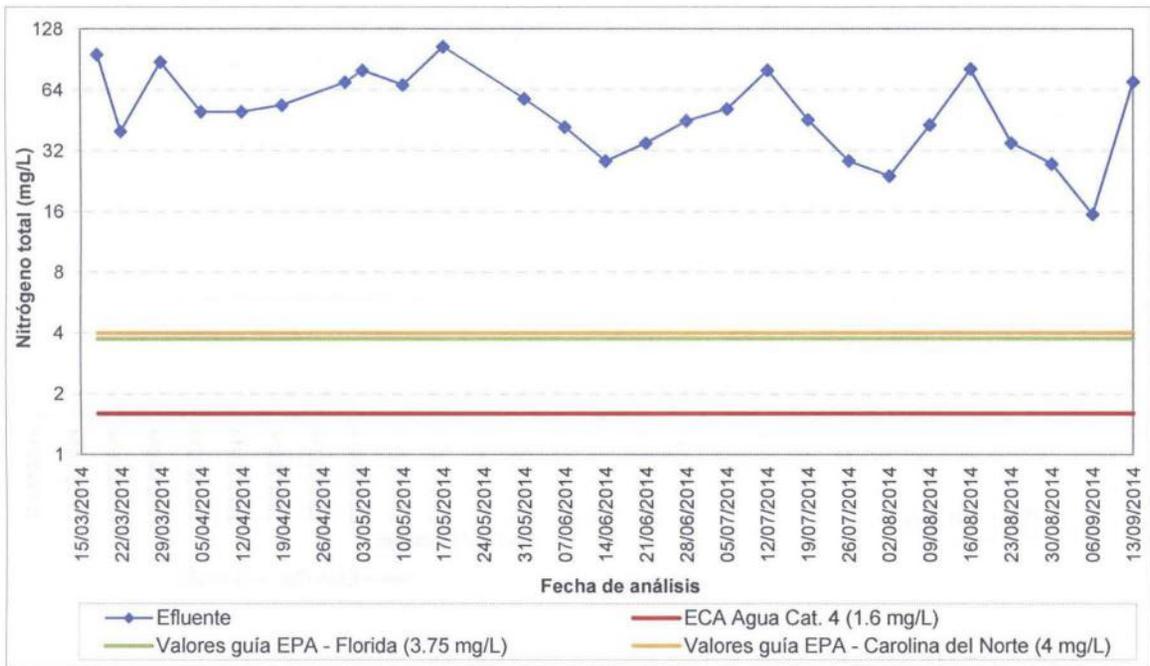




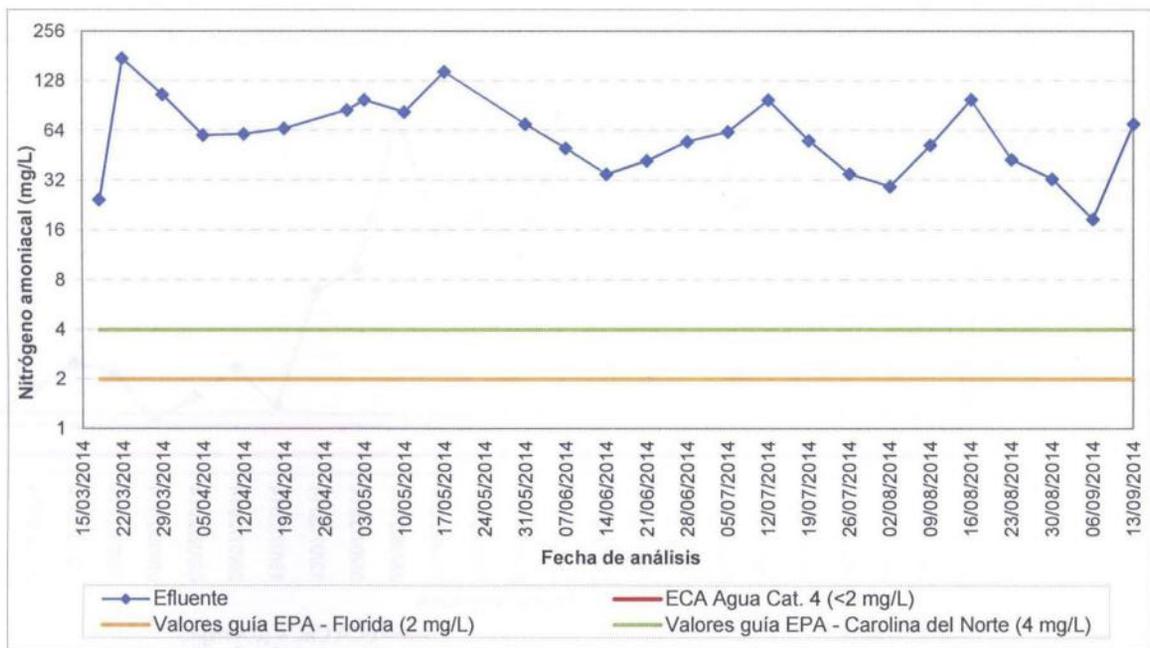
Fosfatos (P₂O₅)



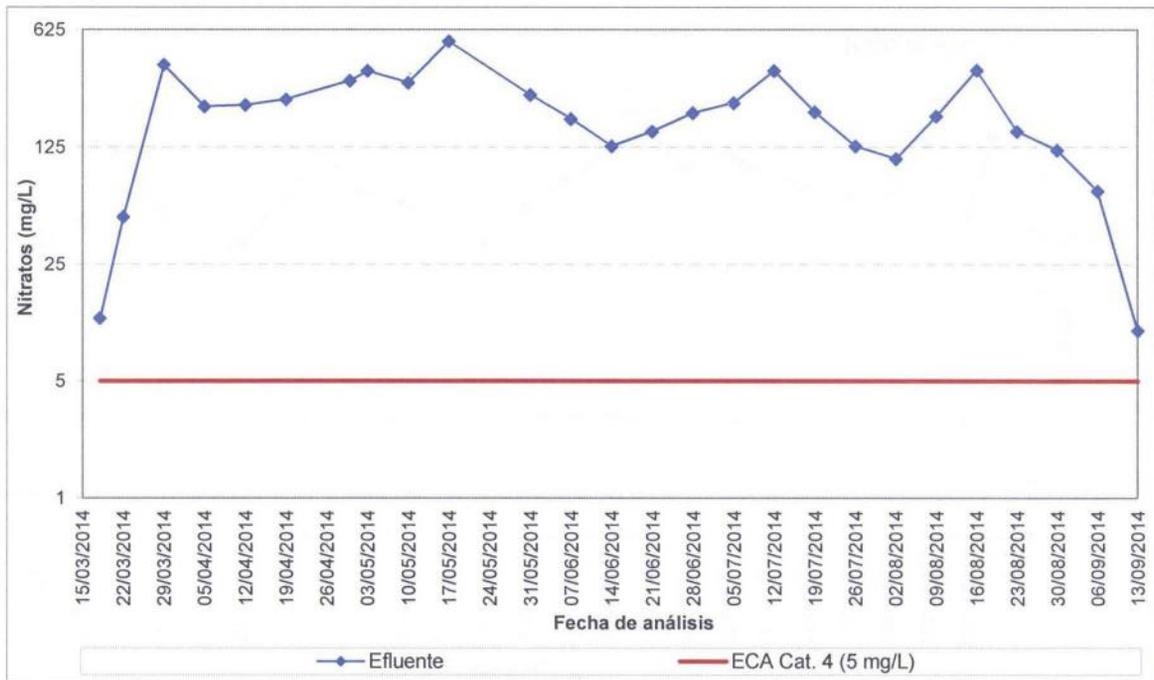
Nitrógeno total



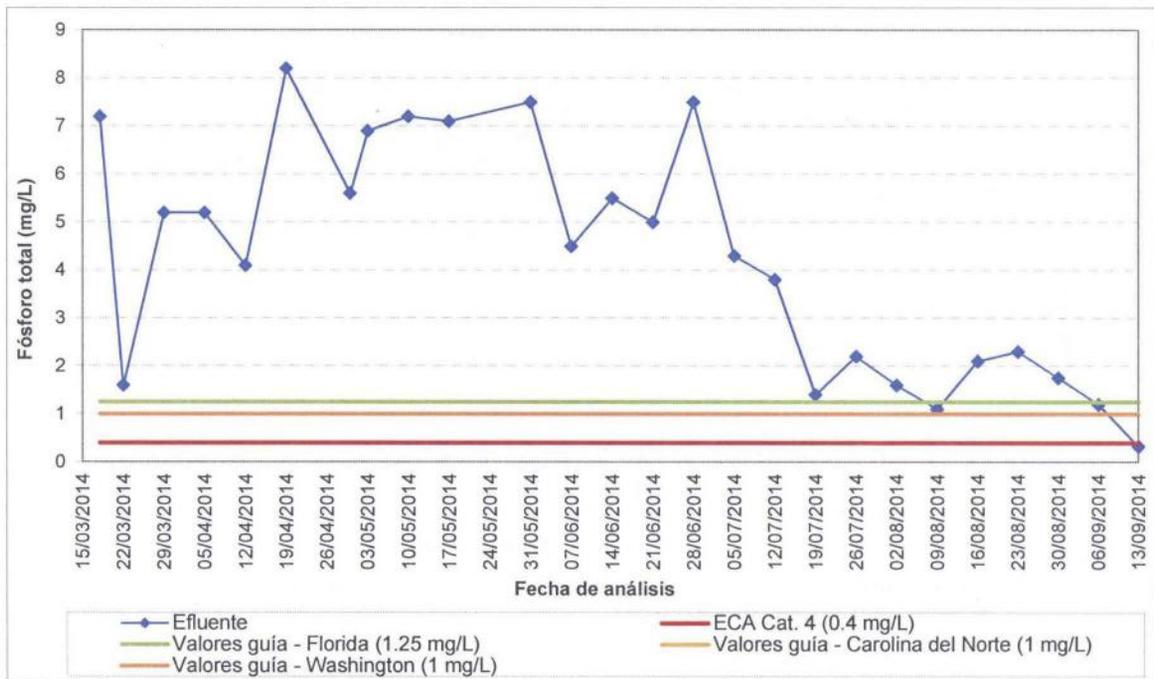
N-amoniacal



Nitratos (NO₃)

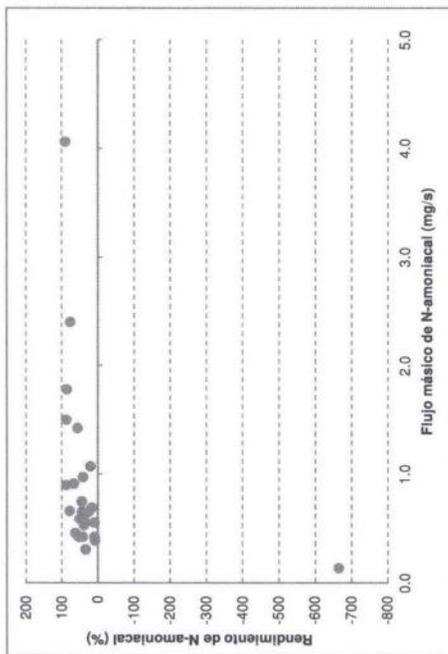
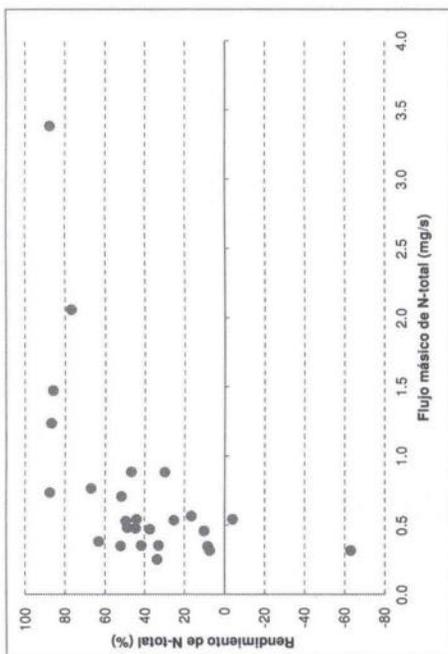


Fósforo total

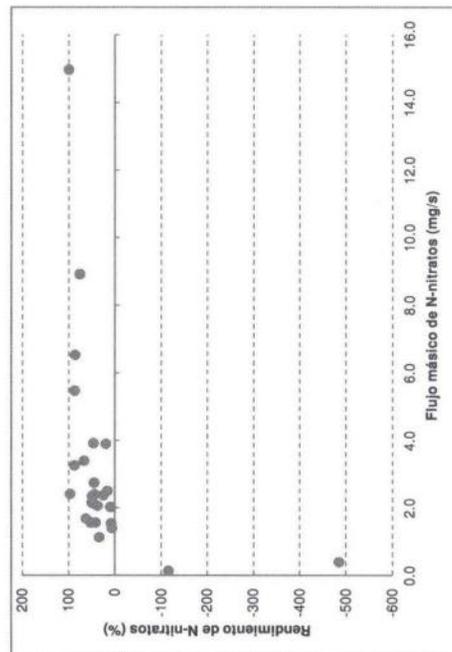


ANEXO 4c

Gráficos y matrices de flujo másico



Día	Flujo másico de N total (mg/s)	Rendimiento de N-total (%)	Flujo másico de N-amoniacaal (mg/s)	Rendimiento de N-amoniacaal (%)	Flujo másico de N-nitratos (mg/s)	Rendimiento de N-nitratos (%)
03/03/2014	0.54	-4	0.66	78.1	2.41	97.1
03/03/2014	0.35	33	0.14	-685.2	0.13	-115.6
03/03/2014	0.32	-63	1.42	56.2	0.39	-484.8
03/03/2014	0.47	37.5	0.56	37.5	2.06	37.7
04/04/2014	0.32	7.4	0.39	7.6	1.40	6.7
04/04/2014	0.35	8.5	0.42	8.3	1.54	8.4
04/04/2014	0.46	10.3	0.55	9	2.02	9.7
04/04/2014	0.56	17	0.69	16	2.50	16.5
05/05/2014	0.54	25.3	0.65	25.2	2.37	25.1
05/05/2014	0.88	30	1.07	20.2	3.91	19.8
05/05/2014	0.71	51.7	0.75	44.9	2.74	45.1
05/05/2014	0.48	48.8	0.59	50	2.15	49.7
06/06/2014	0.25	33.7	0.31	33.1	1.12	33.8
06/06/2014	0.35	41.7	0.42	41.7	1.56	41.7
06/06/2014	0.48	44.4	0.58	44	2.12	44.5
06/06/2014	0.54	44.0	0.65	43.4	2.40	44
07/07/2014	0.88	46.8	0.97	40.8	3.92	46.7
12/07/2014	0.53	49.4	0.53	38.3	2.35	49.5
19/07/2014	0.35	52.1	0.42	51.7	1.55	52.1
25/07/2014	0.38	63.1	0.46	62.2	1.68	62.6
02/08/2014	0.76	66.9	0.91	66.4	3.40	66.9
09/08/2014	2.06	76.9	2.40	76.0	8.91	76.3
16/08/2014	1.47	86	1.78	86	6.53	86
23/08/2014	1.24	86.9	1.50	87	5.47	87.1
30/08/2014	0.74	87.6	0.90	87.8	3.26	87.6
06/09/2014	3.38	87.8	4.06	90	14.97	99.6



ANEXO 5

Resultados de laboratorio del último monitoreo al HAFSS

INFORME DE ENSAYO N° 083817 - 2014 CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL	: ALICIA DEL CARMEN EDUARDO PAREJA
DOMICILIO LEGAL	: AV. SAN FELIPE N° 677 DPTO 701B - JESUS MARIA
SOLICITADO POR	: SRTA. ALICIA DEL CARMEN EDUARDO PAREJA
REFERENCIA	: INGRESO Y SALIDA DEL EFLUENTE TRATADO EN HUMEDAL ARTIFICIAL
PROCEDENCIA	: PANAMERICANA SUR KM 18.5 - CHORRILLOS
FECHA DE RECEPCIÓN	: 2014-09-13
FECHA DE INICIO DE ENSAYOS	: 2014-09-13
MUESTREADO POR	: EL CLIENTE

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C	Unidades
Fósforo Total o fósforo (P)	SM 4500-P E. Phosphorus. Ascorbic Acid Method.	0.010	P mg/L
Fosfatos (PO ₄ ⁻³)	SM 4500-P E. Phosphorus. Ascorbic Acid Method.	0.030	PO ₄ ⁻³ mg/L
Nitratos	SM 4500-NO ₃ ⁻ E. Nitrogen (Nitrate). Cadmium Reduction Method.	0.030	NO ₃ ⁻ - N mg/L
Nitrógeno Amoniacal / NH ₃	SM 4500-NH ₃ -B,C. Nitrogen (Ammonia). Preliminary Distillation Step. Titrimetric Method.	1.00	NH ₄ ⁺ -N mg/L
Nitrógeno total (NTK)	SM 4500-N _{org} -B. Nitrogen (Organic). Macro-Kjeldahl Method.	1.00	NH ₄ ⁺ -N mg/L

L.C.: Límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado		Efluente crudo	Efluente tratado
Matriz analizada		Efluente	Efluente
Fecha de muestreo		2014-09-13	2014-09-13
Hora de inicio de muestreo (h)		09:40	09:50
Condiciones de la muestra		Refrigerada y preservada	Refrigerada y preservada
Código del Cliente		I-H	S-H
Código del Laboratorio		14091073	14091074
Ensayos	Unidades	Resultados	
Fósforo Total o fósforo (P)	P mg/L	0.670	0.327
Fosfatos (PO ₄ ⁻³)	PO ₄ ⁻³ mg/L	0.239	0.109
Nitratos	NO ₃ ⁻ - N mg/L	1.499	10.018
Nitrógeno Amoniacal / NH ₃	NH ₄ ⁺ -N mg/L	84.78	69.94
Nitrógeno total (NTK)	NH ₄ ⁺ -N mg/L	85.95	70.18

III. PERIODO DE CONSERVACIÓN DE MUESTRAS:

Ensayo	Tiempo de perecibilidad
Fosfatos, Nitratos	48 horas
Fosforo, Nitrogeno Amoniacal, NTK	28 días

Lima, 24 de Setiembre del 2014

ANEXO 6

Fotos de la etapa de construcción del HAFSS



Figura 1 Vista del Tanque 6 de la PTAR de Esmeralda Corp S.A.C.



Figura 2 Excavación de la zanja de 3 m x 1 m x 0.8 m



Figura 3 Recubrimiento con geomembrana de HDPE de 4" e instalación del sistema de recolección



Figura 4 Vista de la tubería de recolección de PVC de $\frac{3}{4}$ " de diámetro



Figura 5 Vista de cerca de la conexión en forma de "T" de la tubería de recolección



Figura 6 Tanque de almacenamiento final (ROTOPLAST de 250 L)



Figura 7 Segundo lecho de confitillo de 3/8"



Figura 8 Primer lecho de arena gruesa



Figura 9 Nivelación del primer lecho de arena gruesa



Figura 10 Vista del sistema de tuberías de distribución de PVC de ½"



Figura 11 Capa de piedra chancada de ½" que recubrió el sistema de tuberías de distribución



Figura 12 Tanque de almacenamiento inicial (ROTOPLAST de 250 L)



Figura 13 Siembra de los plantones de totora (*Typha domingensis*)



Figura 14 Plantones de totora sembrados en el HAFSS



Figura 15 Vista de la malla de seguridad instalada alrededor del HAFSS



Figura 16 Vista del sistema de ingreso del afluente al HAFSS

ANEXO 7

Fotos de la etapa de funcionamiento del HAFSS

ANEXO 7. FOTOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL HAFSS



Figura 1 Tanque de almacenamiento inicial



Figura 2 Vista inicial del HAFSS



Figura 3 Vista de plantones de tatora (*Typha domingensis*) sembrados en el HAFFS en el período de arranque, a la izquierda plantón inicial y a la derecha, después de 2 semanas de crecimiento.



Figura 4 Tanque de almacenamiento final



Figura 5 Tanque de almacenamiento final inundado (problema de turbidez en marzo 2014)



Figura 6 HAFSS durante el período de funcionamiento



Figura 7 Vista de las hojas acintadas de la totora en el cuarto mes del período de funcionamiento estándar



Figura 8 Presencia de hojas marchitas en el HAFS, una semana después se realizó la primera poda.



Figura 9 Vista del HAFSS después de la 2° poda.



Figura 10 Hojas acintadas de la totota (*Typha domingensis*)

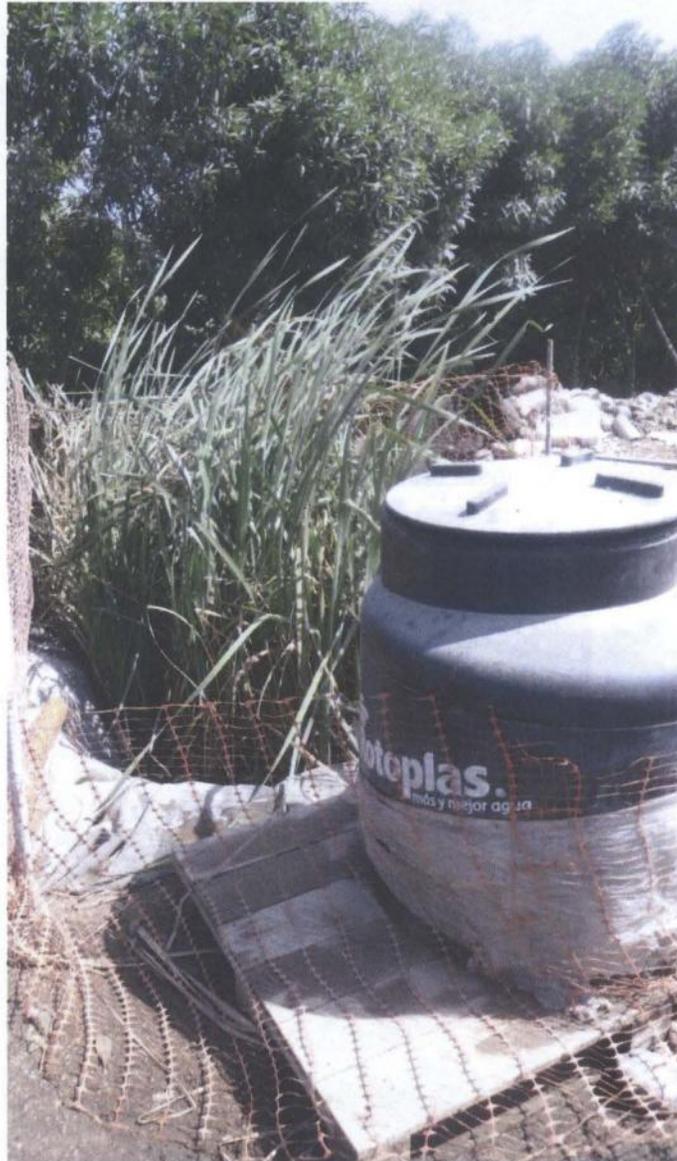


Figura 11 HAFSS en la última semana de monitoreo

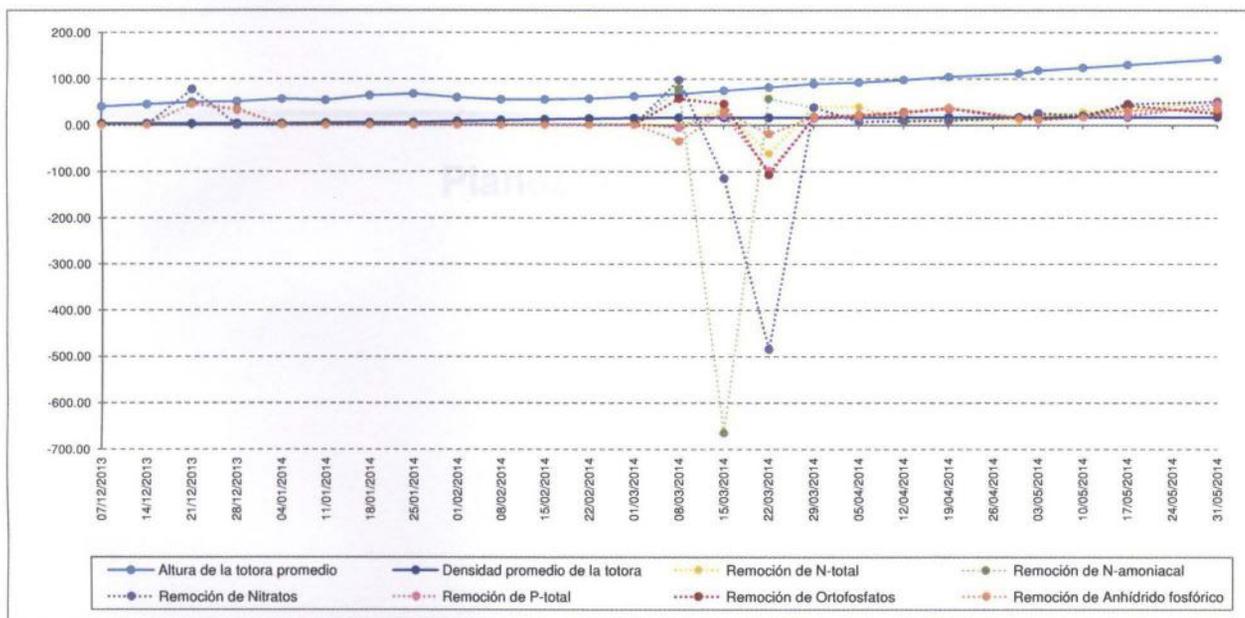
ANEXO 8

Matriz y gráfico de altura y densidad de la totora

Día	Altura de la totora promedio	Densidad promedio de la totora	Remoción de N-total	Remoción de N-amoniacal	Remoción de Nitratos	Remoción de P-total	Remoción de Ortofosfatos	Remoción de Anhidrido fosfórico
07/12/2013	40.00	3.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
14/12/2013	44.60	3.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
21/12/2013	49.80	3.33	76.9	76.6	76.8	44.7	44.1	43.9
28/12/2013	50.91	3.67	NR	NR	NR	33.3	31.9	32.4
04/01/2014	56.27	3.67	NR	NR	NR	NR	NR	NR
11/01/2014	53.79	4.67	NR	NR	NR	NR	NR	NR
18/01/2014	63.94	5.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
25/01/2014	67.56	6.00	NR	NR	NR	NR	NR	NR
01/02/2014	59.72	8.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
08/02/2014	55.19	10.67	NR	NR	NR	NR	NR	NR
15/02/2014	55.30	12.33	NR	NR	NR	NR	NR	NR
22/02/2014	56.86	14.00	NR	NR	NR	NR	NR	NR
01/03/2014	61.67	15.00	NR	NR	NR	NR	NR	NR
08/03/2014	66.55	15.67	-4.0	78.10	97.10	-6.0	56.1	-36.0
15/03/2014	74.13	15.67	33.0	-665.20	-115.60	20.0	44.5	28.0
22/03/2014	81.32	15.67	-63.0	56.20	-484.80	-100.0	-107.7	-20.7
29/03/2014	88.77	15.67	37.5	37.50	37.70	13.3	16.5	16.2
05/04/2014	92.02	16.33	37.50	7.60	6.70	18	19.6	20.1
12/04/2014	97.32	16.67	7.40	8.30	8.40	25.5	26.7	25.7
19/04/2014	104.30	16.67	8.50	9.00	9.70	33.3	35.4	36.1
30/04/2014	111.36	16.67	10.30	16.00	16.00	13.8	13.8	14.1
03/05/2014	117.58	16.67	17.00	25.20	25.10	11.1	11.6	11.8
10/05/2014	123.70	16.67	25.30	20.20	19.80	16.5	16.5	16.5
17/05/2014	130.08	16.67	30.00	44.90	45.10	18.5	40.8	29.9
31/05/2014	142.24	16.67	51.70	50.00	49.70	44.4	24	33.3

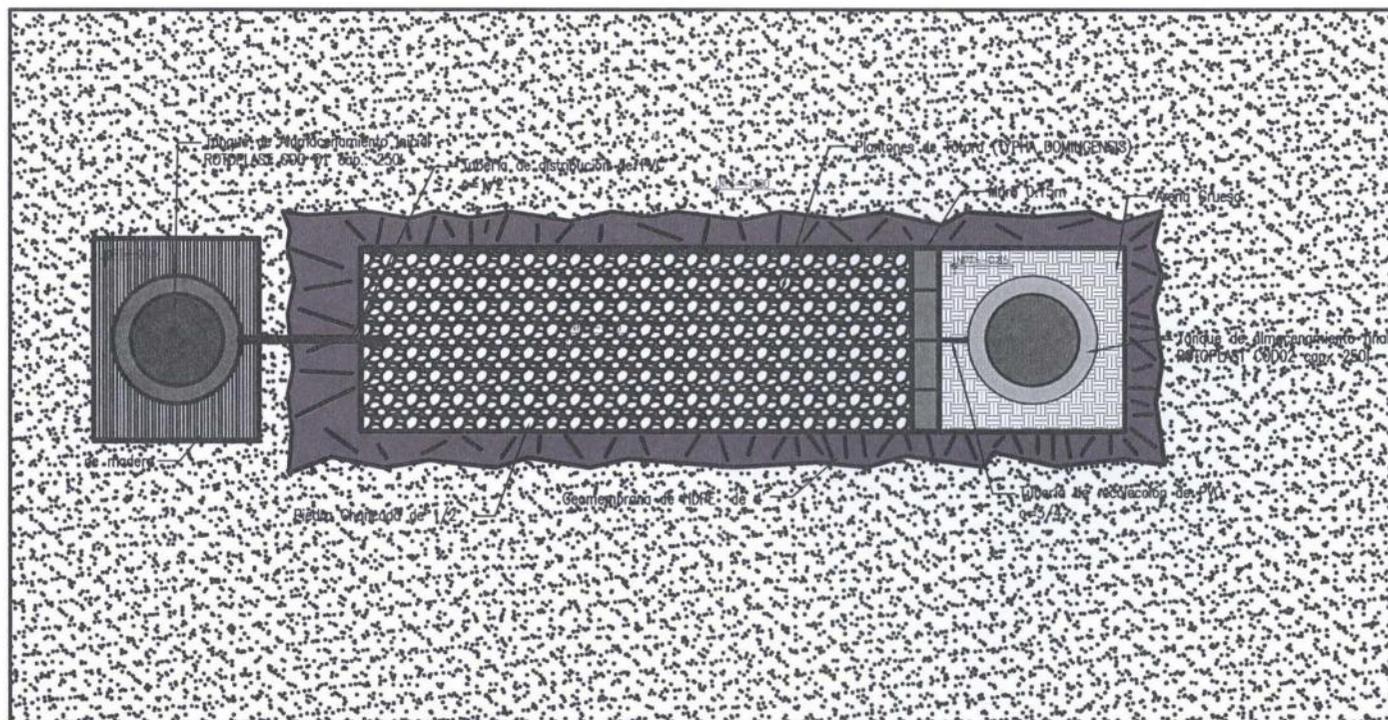
Nota

Período de arranque



ANEXO 9

Planos del dimensionamiento del HAFSS



PLANTA DEL HAFSS

ESC 1/25

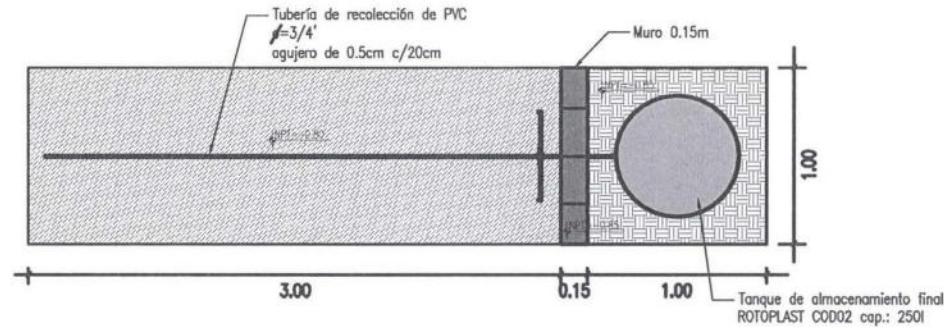
FACULTAD: FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
 ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL
 ASESOR DE: BETTY PEÑA
 TESIS
 TESISTA/ALUMNA : ALICIA DEL CARMEN, EDUARDO PAREJA
 FECHA: 22/07/2015

TESIS:
 "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES DEL EFLUENTE DE LA PTAR DE LA EMPRESA ESMERALDA CORP S.A.C. MEDIANTE EL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES, EMPLEANDO LA ESPECIE *Typha domingensis* (TOTORA)"

UNIVERSIDAD
CIENTÍFICA
DEL SUR

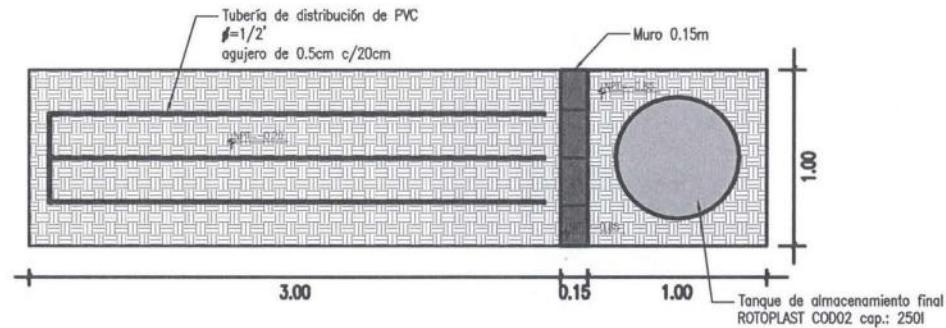


A1



VISTA DESDE LA TUBERIA DE RECOLECCIÓN

ESC 1/25



VISTA DESDE LA TUBERIA DE DISTRIBUCIÓN

ESC 1/25

FACULTAD: FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
 ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

ASESOR DE: BETTY PEÑA
 TESIS

TESISTA/ALUMNA : ALICIA DEL CARMEN, EDUARDO PAREJA

FECHA: 22/07/2015

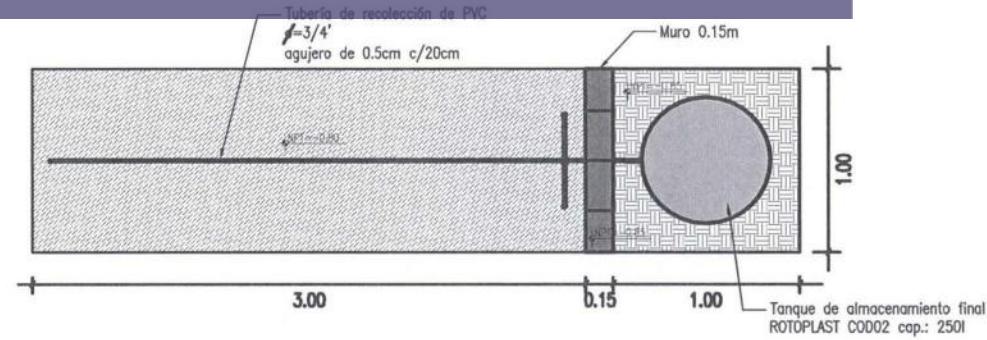
TESIS:

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES DEL EFLUENTE DE LA PTAR DE LA EMPRESA ESMERALDA CORP S.A.C. MEDIANTE EL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES, EMPLEANDO LA ESPECIE *Typha domingensis* (TOTORA)”

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

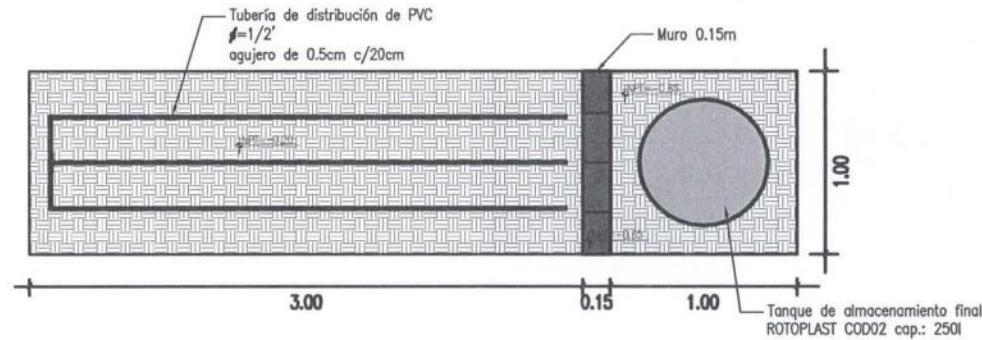


A2



VISTA DESDE LA TUBERIA DE RECOLECCIÓN

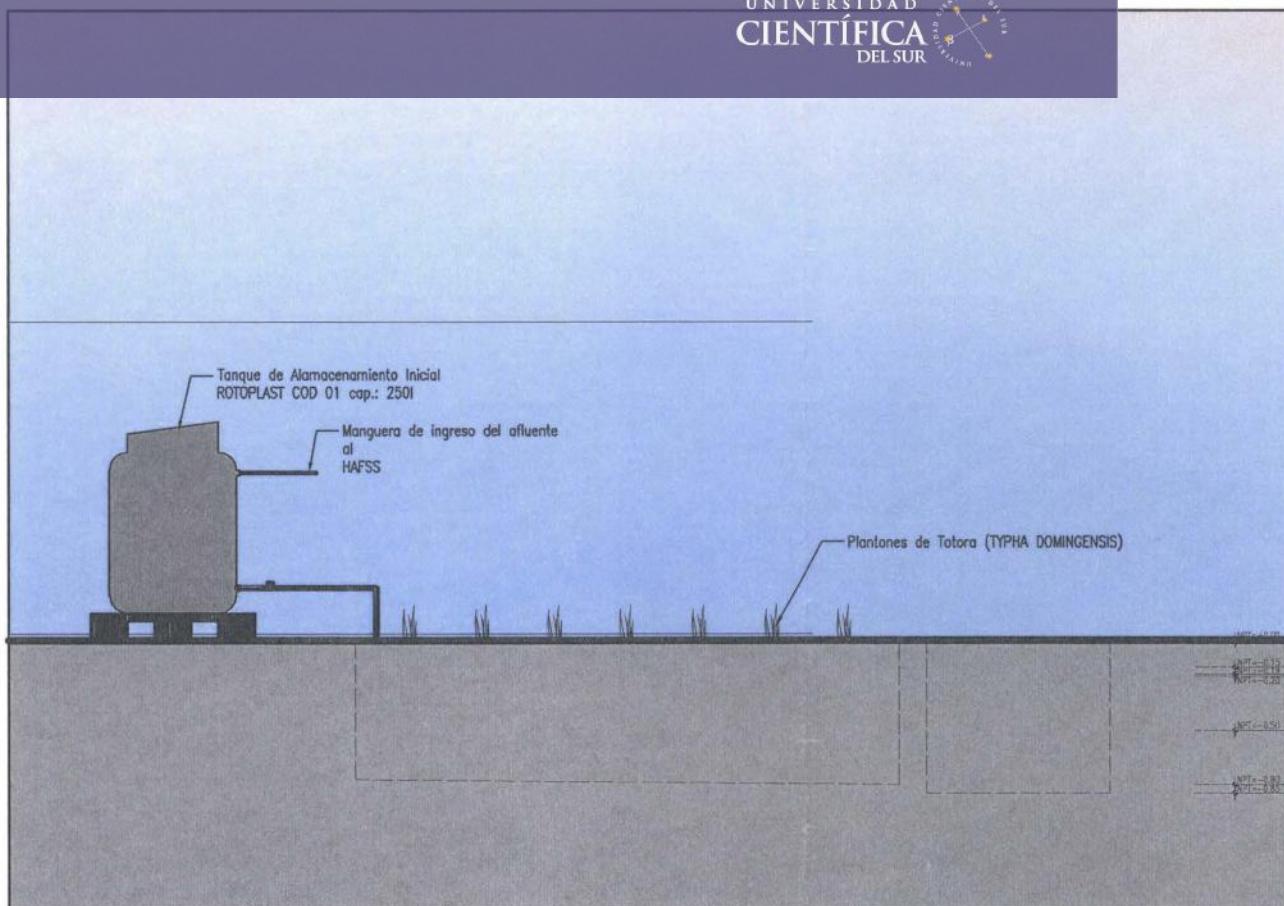
ESC 1/25



VISTA DESDE LA TUBERIA DE DISTRIBUCIÓN

ESC 1/25

<p>FACULTAD: FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL</p> <p>ASESOR DE: BETTY PEÑA TESIS</p> <p>TESISTA/ALUMNA : ALICIA DEL CARMEN, EDUARDO PAREJA</p> <p>FECHA: 22/07/2015</p>	<p>TESIS:</p> <p>“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES DEL EFLUENTE DE LA PTAR DE LA EMPRESA ESMERALDA CORP S.A.C. MEDIANTE EL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES, EMPLEANDO LA ESPECIE <i>Typha domingensis</i> (TOTORA)”</p>	<p>UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR</p> 	<p>A2</p>
--	---	--	------------------



ELEVACIÓN

ESC 1/25

<p>FACULTAD: FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL</p> <p>ASESOR DE: BETTY PEÑA TESIS</p> <p>TESISTA/ALUMNA : ALICIA DEL CARMEN, EDUARDO PAREJA</p> <p>FECHA: 22/07/2015</p>	<p>TESIS:</p> <p>“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES DEL EFLUENTE DE LA PTAR DE LA EMPRESA ESMERALDA CORP S.A.C. MEDIANTE EL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES, EMPLEANDO LA ESPECIE <i>Typha domingensis</i> (TOTORA)”</p>	<p>UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR</p> 	<p>A3</p>
--	---	---	------------------