

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



INFLUENCIA DE LOS MATERIALES FILTRANTES, PVC CORRUGADO Y GRAVA, EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA, EN HUMEDALES ARTIFICIALES

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO SANITARIO

PRESENTADO POR:

DIEGO SALVADOR GOICOCHEA ARÉVALO

LIMA-PERÚ

2014

DEDICATORIA

A Dios sea la gloria y la honra.

A mis padres, por su amor y sabiduría,
porque cuando se trabaja con amor,
siempre, se logran grandes cosas.

Diego Salvador

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Otto Bruno Rosasco Gerkes, por su sabiduría y asesoramiento durante el desarrollo de la presente investigación.

A la Msc. Ing. Rosa Elena Yaya Beas, por la oportunidad dada para iniciar la investigación en el CITRAR-UNI.

Al equipo del Centro de Información de la Facultad de Ingeniería Ambiental, por su amable atención otorgada siempre.

Al equipo del CITRAR-UNI, por su disposición de apoyo permanente.

A Santiago, Hawell, Abigail y Hugo, futuros socios, por su fundamental asistencia durante el monitoreo de la investigación.

RESUMEN

La investigación planteó aumentar el rendimiento de los humedales artificiales, cambiando el material filtrante de grava a PVC corrugado. Esto se realizó a través de la implementación de dos humedales artificiales que operaron en paralelo, a iguales condiciones de diseño, durante siete meses. La única diferencia que existió en el diseño de los humedales artificiales fue la presencia del material filtrante, dado que uno tuvo grava y el otro de PVC corrugado. Entre las principales ventajas del uso PVC corrugado, como material filtrante, en humedales artificiales, se encuentran los beneficios técnico (buen rendimiento) y económico (bajo costo de inversión), la relevancia socio-ambiental (producción de efluente con menor carga contaminante), las implicancias prácticas (facilidad de transporte y peso ligero del material) y el valor teórico científico (mecanismos biológicos de remoción) que se reflejan en la presente investigación.

Por un lado, los parámetros de diseño fueron establecidos a través de un caudal de ingreso de 2 ml/s. Por ello, en el humedal artificial con grava, el tiempo de retención hidráulico fue 6.5 horas, mientras que en el humedal artificial con PVC corrugado fue 14.5 horas; la variación del tiempo de retención hidráulico entre ambos humedales fue consecuencia de las porosidades de los materiales filtrantes: grava, 36.10% y PVC corrugado, 80.50%. Por otro lado, el rendimiento de los humedales artificiales tuvo un enfoque definido, el cual fue la remoción de materia orgánica. En ese sentido, la evaluación del sistema de humedales se llevó a cabo mediante los parámetros de calidad de agua residual relacionados a la presencia de materia orgánica: temperatura, turbiedad, pH, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno.

Los resultados de la investigación permitieron estimar la eficiencia en remoción de materia orgánica de los humedales artificiales. El rendimiento del humedal artificial con PVC corrugado fue superior al rendimiento del humedal artificial con grava, debido a que la superficie específica del PVC corrugado fue más extensa, lo que elevó la remoción de los contaminantes, por el mecanismo biológico de adsorción. Asimismo, se observó que la máxima eficiencia de la DBO5 en el humedal artificial con grava fue 56.4%, mientras que en el humedal artificial con PVC corrugado fue 72.8%. Además, se observó que la máxima eficiencia de la DQO en el humedal artificial con grava fue 42.8%, mientras que en el humedal artificial con PVC corrugado fue 54.2%. También, se observó que la máxima eficiencia de los SST en el humedal artificial con grava fue 61.6%, mientras que en el humedal artificial con PVC corrugado fue 79.9%

En consecuencia, el humedal artificial con PVC corrugado, como material filtrante, puede ser considerado como una opción técnica apropiada para el tratamiento de aguas residuales, debido a que, al ser implementado, tendría un bajo costo de inversión y un buen rendimiento operativo en la remoción de materia orgánica.

INDICE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	1
DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
CAPÍTULO I	1
PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	1
A. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
B. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
C. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	2
1. OBJETIVO GENERAL	2
2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
D. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
E. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
CAPÍTULO II	5
FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS	5
A. ANTECEDENTES	5
B. MARCO TEORICO	7
1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	7
2. TRATAMIENTO BIOLÓGICO	9
3. HUMEDALES ARTIFICIALES	11
4. TUBO DE PVC CORRUGADO	25
5. GRAVA	26
C. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	27

VII

D.	VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	27
1.	VARIABLES INDEPENDIENTES	27
2.	VARIABLES DEPENDIENTES	27
3.	VARIABLES INTERVINIENTES	27
CAPÍTULO III		28
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		28
A.	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	28
B.	DESCRIPCION DE LA INVESTIGACIÓN.....	28
1.	TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	30
2.	DISTRIBUIDOR DE CAUDAL.....	30
3.	HUMEDALES ARTIFICIALES	30
4.	RECOLECTORES DE CAUDAL.....	30
C.	PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	31
1.	TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	31
2.	DISTRIBUIDOR DE CAUDAL.....	32
3.	HUMEDALES ARTIFICIALES	33
4.	RECOLECTOR DE CAUDAL.....	35
D.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
1.	MATERIAL FILTRANTE	36
2.	POROSIDAD.....	37
3.	CAUDAL DE INGRESO.....	38
4.	CAUDAL DE SALIDA	38
5.	EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	38
6.	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO	39
7.	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	40

VIII

8. CARGA HIDRÁULICA	41
9. CARGA ORGÁNICA	41
E. MONITOREO DE LA INVESTIGACIÓN	42
1. PUNTOS DE MONITOREO.....	42
2. PARAMETROS CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	43
3. PERÍODO DE OPERACION.....	45
4. FRECUENCIA DE MONITOREO	46
5. IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS TÉCNICAS	47
CAPÍTULO IV	50
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	50
A. REGISTRO DE LA TURBIEDAD	51
1. RESULTADO DE LA TURBIEDAD	51
2. ANÁLISIS DE LA TURBIEDAD	59
B. REGISTRO DE LA TEMPERATURA	61
1. RESULTADO DE LA TEMPERATURA	61
2. ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA	67
C. REGISTRO DEL pH	69
1. RESULTADO DEL pH	69
2. ANÁLISIS DEL pH	75
D. REGISTRO DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS.....	77
1. RESULTADO DE LOS SST	78
2. ANÁLISIS DE LOS SST	82
3. RESULTADO DE LOS SSF	84
4. ANÁLISIS DE LOS SSF	88
5. RESULTADO DE LOS SSV	90

IX

6. ANÁLISIS DE LOS SSV	94
E. REGISTRO DE LA DEMANA QUÍMICA DE OXÍGENO	96
1. RESULTADO DE LA DQO	96
2. ANÁLISIS DE LA DQO	101
F. REGISTRO DE LA DEMANA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	103
1. RESULTADO DE LA DBO ₅	103
2. ANÁLISIS DE LA DBO ₅	108
CAPÍTULO V	110
CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS	110
A. SOBRE LA TURBIEDAD	110
B. SOBRE LA TEMPERATURA	111
C. SOBRE EL pH	112
D. SOBRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS	113
E. SOBRE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	114
F. SOBRE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	115
G. SOBRE LAS PLANTAS ACUÁTICAS	117
H. SOBRE EL MATERIAL FILTRANTE	117
I. SOBRE EL HUMEDAL ARTIFICIAL	118
CAPÍTULO VI	119
RECOMENDACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	119
A. SOBRE EL HUMEDAL ARTIFICIAL	119
B. SOBRE LA INVESTIGACIÓN	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO: PANEL FOTOGRÁFICO	122

INDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO II-01: ESQUEMA DE LA PTAR, HUMEDAR-I.....	5
GRÁFICO II-02: MEDIOS DE SOPORTE PLÁSTICO (MSP).....	6
GRÁFICO II-03: ESQ. HUMEDAL ARTIFICIAL FLUJO SUPERFICIAL.....	13
GRÁFICO II-04: ESQ. HUMEDAL ARTIFICIAL FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	14
GRÁFICO II-05: PROCESO DE LA FITORREMEDIACIÓN.....	16
GRÁFICO II-06: MUESTRA DEL TUBO PVC CORRUGADO.....	25
GRÁFICO II-07: MUESTRA DE GRAVA.....	26
GRÁFICO III-01: UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	28
GRÁFICO III-02: RECORRIDO DEL AGUA RESIDUAL.....	29
GRÁFICO III-03: HUMEDALES ARTIFICIALES DURANTE LA OPERACIÓN..	31
GRÁFICO III-04: TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	31
GRÁFICO III-05: TUBO PERFORADO DISTRIBUIDOR DE CAUDAL.....	32
GRÁFICO III-06: DISTRIBUIDOR DE CAUDAL.....	32
GRÁFICO III-07: ESTRUCTURA DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	33
GRÁFICO III-08: INTERIOR PARTE FRONTAL INFERIOR DEL HUMEDAL...33	
GRÁFICO III-09: HUMEDALES ARTIFICIALES CON SUS MATERIALES.....	33
GRÁFICO III-10: MALLA PLASTIFICADA EN EL HUMEDAL CON PVC.....	34
GRÁFICO III-11: RAICES DE TOTORA PLANTADAS.....	35
GRÁFICO III-12: RECOLECTOR DE CAUDAL.....	35
GRÁFICO III-13: MATERIALES FILTRANTES: GRAVA Y PVC.....	36
GRÁFICO III-14: PUNTOS DE MONITOREO.....	42
GRÁFICO III-15: TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	47
GRÁFICO III-16: TUBO PERFORADO CON MATERIA ORGÁNICA.....	48

XI

GRÁFICO III-17: BOQUILLA CON PARTÍCULAS BLANCAS.....	49
GRÁFICO IV-01: REGISTRO DE LA TURBIEDAD.....	57
GRÁFICO IV-02: REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD.....	58
GRÁFICO IV-03: REGISTRO DE LA TEMPERATURA.....	66
GRÁFICO IV-04: REGISTRO DEL pH.....	74
GRÁFICO IV-05: REGISTRO DE LOS SST.....	80
GRÁFICO IV-06: REMOCIÓN DE LOS SST.....	81
GRÁFICO IV-07: REGISTRO DE LOS SSF.....	86
GRÁFICO IV-08: REMOCIÓN DE LOS SSF.....	87
GRÁFICO IV-09: REGISTRO DE LOS SSV.....	92
GRÁFICO IV-10: REMOCIÓN DE LOS SSV.....	93
GRÁFICO IV-11: REGISTRO DE LA DQO.....	99
GRÁFICO IV-12: REMOCIÓN DE LA DQO.....	100
GRÁFICO IV-13: REGISTRO DE LA DBO5.....	106
GRÁFICO IV-14: REMOCIÓN DE LA DBO5.....	107

INDICE DE CUADROS

CUADRO II-01: ESTEQUIOMETRÍA DEL PROCESO AEROBIO.....	10
CUADRO II-02: GRUPOS DE BACTERIAS DEL PROCESO ANAEROBIO.....	11
CUADRO II -03: MECANISMOS DE REMOCIÓN.....	21
CUADRO II -04: MATERIA EN SUSPENSIÓN VERSUS DISTANCIA.....	23
CUADRO IV -01: REGISTRO DE LA TURBIEDAD S01-S06.....	53
CUADRO IV -02: REGISTRO DE LA TURBIEDAD S07-S13.....	54
CUADRO IV -03: REGISTRO DE LA TURBIEDAD S14-S21.....	55
CUADRO IV -04: REGISTRO DE LA TURBIEDAD S22-S28.....	56
CUADRO IV -05: REGISTRO DE LA TEMPERATURA S01-S07.....	62
CUADRO IV -06: REGISTRO DE LA TEMPERATURA S08-S14.....	63
CUADRO IV -07: REGISTRO DE LA TEMPERATURA S15-S21.....	64
CUADRO IV -08: REGISTRO DE LA TEMPERATURA S22-S28.....	65
CUADRO IV -09: REGISTRO DEL pH S01-S07.....	70
CUADRO IV -10: REGISTRO DEL pH S08-S14.....	71
CUADRO IV -11: REGISTRO DEL pH S15-S21.....	72
CUADRO IV -12: REGISTRO DEL pH S22-S28.....	73
CUADRO IV -13: REGISTRO DE LOS SST S01-S28.....	79
CUADRO IV -14: REGISTRO DE LOS SSF S01-S28.....	85
CUADRO IV -15: REGISTRO DE LOS SSV S01-S28.....	91
CUADRO IV -16: REGISTRO DE LA DQO S01-S28.....	98
CUADRO IV -17: REGISTRO DE LA DBO ₅ S01-S28.....	105

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

A. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

El contexto de la investigación está orientado, principalmente, a los factores que influyeron en el desarrollo del presente trabajo. Estos factores influyeron de manera directa, debido a que fueron elementos relacionados al sistema externo inmediato de la investigación. Los factores que influyeron fueron la ubicación geográfica, el periodo de la investigación, las condiciones climatológicas, la calidad del agua residual del afluente del sistema de humedales y los materiales empleados en la investigación. Por un lado, la investigación se ubicó en el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos de la Universidad Nacional de Ingeniería, ubicado en la ciudad de Lima. En ese lugar, el periodo de la investigación fue siete meses, entre agosto de 2013 y marzo de 2014. En ese tiempo, las condiciones climatológicas tuvieron grandes contrastes; al tener un clima templado y cálido, las temperaturas del agua residual variaron desde los 16°C hasta los 31°C. Por otro lado, la calidad del agua residual afluente de los humedales artificiales fue la misma que la calidad del agua residual efluente de un reactor RAMLFA. Finalmente, los materiales empleados en la investigación fueron polietileno de alta densidad, policloruro de vinilo y grava.

B. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En nuestro país, el crecimiento de la población viene generando una gran demanda en el tratamiento de aguas residuales, sobre todo, en zonas rurales, donde el uso de humedales artificiales es apropiado. Frente a esta situación, se plantea aumentar el rendimiento de los humedales artificiales, cambiando el material filtrante de grava a PVC corrugado. Evidentemente, el material filtrante es un componente importante en el humedal artificial, debido a que es parte del medio físico donde se produce la remoción de la

materia orgánica y, también, porque proporciona la superficie necesaria para el desarrollo de la biopelícula. Asimismo, el PVC corrugado, por su forma característica, tiene mayor superficie específica que la grava. Esto favorece al proceso biológico para lograr mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica. En consecuencia, se pretende demostrar que el rendimiento del humedal artificial con PVC corrugado será más eficiente que el del humedal artificial con grava.

C. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de los materiales filtrantes, PVC corrugado y grava, en la remoción de materia orgánica en humedales artificiales.

2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a) *Determinar la turbiedad en los puntos de monitoreo de los humedales artificiales.*
- b) *Determinar la temperatura en los puntos de monitoreo de los humedales artificiales.*
- c) *Determinar el pH en los puntos de monitoreo de los humedales artificiales.*
- d) *Determinar los sólidos suspendidos en los puntos de monitoreo de los humedales artificiales.*
- e) *Determinar la demanda química de oxígeno en los puntos de monitoreo de los humedales artificiales.*
- f) *Determinar la demanda bioquímica de oxígeno en los puntos de monitoreo de los humedales artificiales.*

D. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizó debido a que aporta beneficios técnicos y económicos; además, tiene una relevancia socio-ambiental; también, considera implicancias prácticas; y, representa un valor teórico. En primer lugar, los beneficios de la investigación se encuentran expresados en el aspecto técnico y económico. En lo técnico, mediante la influencia del PVC corrugado, como material filtrante, se alcanza elevada eficiencia en remoción de materia orgánica. En lo económico, el PVC corrugado disminuye el costo de inversión y es una opción accesible en el mercado. Aparte de ello, la relevancia socio-ambiental radica en la conservación del ambiente. Es decir, las poblaciones que implementen humedales artificiales con PVC corrugado, como material filtrante, producirán mejor calidad de efluente que reducirá la contaminación del ambiente. Asimismo, las implicancias prácticas que tiene el uso del PVC corrugado son, por un lado, la facilidad del transporte, dado que es un material de características flexibles que se acomoda fácilmente a los espacios y, por otro lado, el peso ligero del material, ya que este no representa mayor dificultad para el traslado respectivo. Por ello, estas cualidades, entre otras, lo convierten en las principales ventajas para su elección. De igual forma, el valor teórico de la investigación se refleja en el mecanismo de adsorción en lechos de oxidación biológica. En otras palabras, el PVC corrugado, por su forma característica, al presentar extensa y doble capa superficial, la externa y la interna, incorpora, como parte del proceso biológico, microorganismos que, adhiriéndose a la superficie del material filtrante, forman la biopelícula, para remoción de materia orgánica, mediante el mecanismo de adsorción. Por consiguiente, los humedales artificiales con PVC corrugado, como material filtrante, tendrán un alto rendimiento, dado que la biopelícula que se forma en la superficie del material filtrante degradará mayor cantidad de materia orgánica.

E. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo del presente trabajo estuvo delimitado por el espacio geográfico, el periodo de investigación y el enfoque considerado. Por un lado, el espacio geográfico donde se desarrolló la investigación fue en el Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos de la Universidad Nacional de Ingeniería, ubicado en la ciudad de Lima, la cual tuvo un clima templado sin excesivo de calor tropical ni fríos extremos. Por otro lado, el periodo de la investigación, en el que se desarrolló el presente trabajo, fue entre agosto de 2013 y marzo de 2014, el cual tuvo temperaturas que variaron desde los 16°C hasta los 31°C. Por último, la investigación tuvo, absolutamente, un enfoque definido, el cual fue la remoción de materia orgánica; por ello, los parámetros de calidad del agua residual evaluados en el presente trabajo fueron los relacionados a la presencia de materia orgánica: turbiedad, temperatura, pH, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno.

En consecuencia, el tema delimitado fue *“La influencia de los materiales filtrantes, PVC corrugado y grava, en la remoción de materia orgánica en humedales artificiales, entre agosto 2013 y marzo 2014, en el Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos de la Universidad Nacional de Ingeniería”*.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS

A. ANTECEDENTES

En el 2011, se presentó el estudio "*Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandul*", en el Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, elaborado por Alejandra Otárola Rodríguez para optar el título de Magister en Ing. Ambiental.

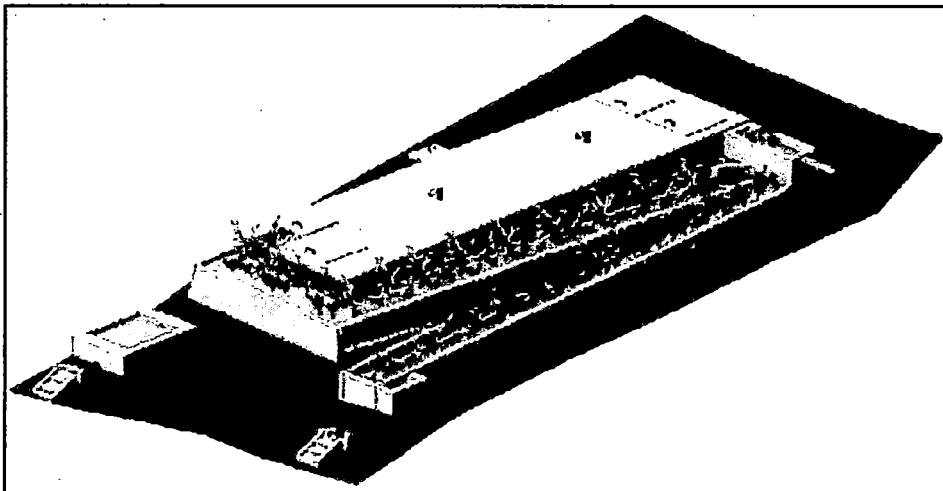


Gráfico II-01
Esquema de la PTAR, HUMEDAR-I.

Adaptada de Sanabria (2009).

Esta investigación desarrolló un sistema de tratamiento denominado HUMEDAR-I (Gráfico II-01). La configuración HUMEDAR-I involucra un reactor anaerobio en serie con un humedal artificial. El sistema de tratamiento se diseñó para un caudal de 7 m³/d y un tiempo de retención hidráulico de 2.77 día. En este sistema, la principal característica es la presencia de material plástico como medio filtrante del humedal artificial. Las plantas del humedal son macrófitas y están soportadas sobre el

material plástico. Se estima que el material plástico (Gráfico II-02), por su forma característica, tiene 300 m²/m³ de superficie específica.

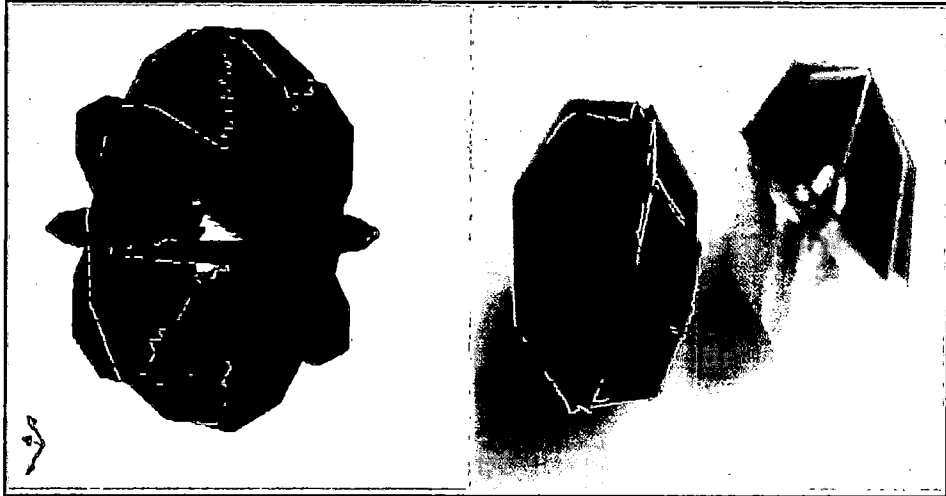


Gráfico II-02
Medios de soporte plástico (MSP).

Adaptada de Sanabria (2009).

En la evaluación del HUMEDAR-I, se realizó el análisis de los parámetros de calidad de agua que permitió estimar la eficiencia en remoción del humedal artificial y del sistema de tratamiento. La eficiencia en remoción es la relación entre la diferencia de cargas contaminantes en la entrada y la salida, y la carga contaminante en la entrada. En consecuencia, para el sistema de tratamiento, la eficiencia en remoción corresponde a la carga contaminante en el afluente y el efluente de la planta de tratamiento. Asimismo, para el humedal artificial, la eficiencia en remoción corresponde a la carga contaminante en el afluente y el efluente del humedal artificial. Los principales parámetros evaluados fueron la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST). Por un lado, al evaluar la remoción de la DBO₅ en el humedal artificial, se observaron eficiencias alrededor del 53%, mientras que para el sistema de tratamiento se obtuvieron eficiencias mayores de 85%. Por otro lado, al evaluar la remoción de la DQO en el humedal artificial se observaron eficiencias alrededor del 63%, mientras

que para el sistema de tratamiento se obtuvieron eficiencias entre el 77% y 95%. Por último, al evaluar la remoción de los SST en el humedal artificial se observaron eficiencias entre 88% y 97%, mientras que para el sistema de tratamiento se obtuvieron eficiencias entre 85% y 90%.

B. MARCO TEORICO

En Latinoamérica, debido al incremento de la población, la descarga de las aguas residuales se ha convertido en uno de los problemas ambientales más críticos de la región. Las aguas residuales son responsables, en gran porcentaje, de la morbilidad en los países en vía de desarrollo. Esta situación se encuentra estrechamente relacionada con las bajas coberturas en el sistema de alcantarillado y el inadecuado tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, en Colombia, la cobertura en el sistema de alcantarillado representa el 86.20% de la población total. (Fuente: Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia, 2004). Asimismo, solamente, el 10% del agua residual tienen un tratamiento adecuado; el 90% no tiene tratamiento o es deficiente. (Fuente: Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia, 2004). En Perú, la situación no es ajena, la cobertura en el sistema de alcantarillado es el 57% de la población total. (Fuente: Plan Nacional de Saneamiento 2006-2015-MVCS). Aparte de ello, el 22% del agua residual tiene tratamiento, y, solamente, el 6% es un tratamiento aceptable; el resto es vertido directamente a un cuerpo receptor de agua. (Fuente: Plan Nacional de Saneamiento 2006-2015-MVCS).

1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales consiste en un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos para lograr la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual. Además, el tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo proteger la salud pública y el medio ambiente, y reusar el agua tratada en actividades recreacionales, en el riego de áreas verdes y en servicios

industriales. En general, los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen las siguientes etapas: pre tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. Estas etapas se detallan a continuación.

a) *Pre tratamiento:*

Es el proceso que se retiene los sólidos que están presentes en el agua residual y cuya presencia puede provocar problemas en la operación del tratamiento. Este proceso involucra el desbaste, la flotación y el desarenado. En primer lugar, el desbaste consiste en la retención de los sólidos gruesos a través de un sistema de rejillas a modo de criba. Luego, la flotación se refiere a la eliminación de grasas y aceites. Finalmente, el desarenado es remoción de la materia en suspensión gruesa. (Romero, 2000).

b) *Tratamiento primario:*

Es el proceso que se refiere a la remoción parcial, mediante sedimentación, de sólidos suspendidos y materia orgánica particulada. El objetivo de este proceso es acondicionar el agua residual para el siguiente tratamiento, el biológico. Por lo general, el tratamiento primario, en un sistema convencional, remueve alrededor de 60% de sólidos suspendidos y 40% de DBO5 (Romero, 2000).

c) *Tratamiento secundario:*

El tratamiento secundario, también conocido como biológico, es el proceso que realiza, principalmente, para la remoción de los sólidos suspendidos volátiles y la DBO5 soluble. Entre las tecnologías que desarrollan este tipo de tratamiento se encuentran los lodos activados, filtros

percoladores, sistemas de lagunaje, humedales artificiales, entre otros. (Romero, 2000).

d) Tratamiento terciario:

Es el proceso que remueve nutrientes para prevenir la eutrofización de fuentes receptoras de agua; asimismo, remueve patógenos para mejorar la calidad del efluente secundario con la finalidad de un posible reúso. (Romero, 2000).

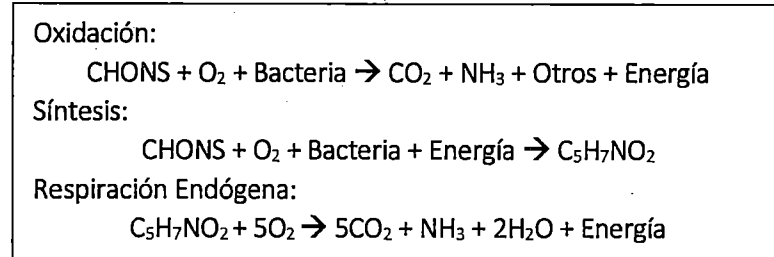
2. TRATAMIENTO BIOLÓGICO

El tratamiento biológico disminuye la carga orgánica de compuestos biodegradables que están presentes en el agua residual. La carga orgánica se entiende por el oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para degradar la materia orgánica. Asimismo, el tratamiento biológico contempla dos categorías: aerobio y anaerobio.

a) Tratamiento aerobio:

Es un proceso en el cual los microorganismos convierten la materia orgánica en dióxido de carbono, biomasa y agua. Por un lado, el tratamiento aerobio lleva a cabo procesos catabólicos oxidativos. El catabolismo es una fase del metabolismo. En esta fase, las moléculas orgánicas son transformadas de complejas a simples. Por otro lado, existen dos tipos de tratamiento aerobio: biomasa suspendida y biomasa fija. En la biomasa suspendida, los microorganismos se encuentran en suspensión. Mediante aireaciones en el agua residual, los microorganismos reciben oxígeno para agruparse en flóculos y formar el lodo activado. Luego, el lodo activado sedimenta y queda

separado del agua residual. En la biomasa fija, los microorganismos se adhieren a la superficie del medio filtrante formando la biopelícula. Cuanto mayor sea la superficie de contacto, el tratamiento será más eficiente. La estequiometría del proceso está en el siguiente cuadro:



<p>Cuadro II-01 Estequiometría del proceso aerobio.</p>
--

b) Tratamiento anaerobio:

Es un proceso fermentativo en el cual la materia orgánica se descompone para producir dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Por un lado, el tratamiento anaerobio tiene la capacidad de mantener constante, durante la producción del metano, la cantidad de electrones de la materia orgánica. Es decir, en vista de que no hay oxidación, se tiene que la demanda química de oxígeno teórica del metano equivale en gran parte a la demanda química de oxígeno de la materia orgánica digerida. Solamente, una mínima parte de la demanda química de oxígeno es convertida en lodo. Asimismo, en las reacciones bioquímicas, la menor parte de la energía es liberada; la mayor parte, permanece como energía química en el metano producido. Por otro lado, la degradación anaerobia de la materia orgánica requiere la intervención de diversos grupos de bacterias facultativas y anaerobias. Estas bacterias utilizan en forma secuencial los productos metabólicos generados por cada grupo. Los grupos se presentan en el siguiente cuadro:

Hidrólisis:	Grupo I: bacterias hidrolíticas.
Acidogénesis:	Grupo I: bacterias fermentativas.
Acetogénesis:	Grupo II: bacterias acetogénicas.
Metanogénesis:	Grupo III: bacterias metanogénicas.

Cuadro II-02
Grupos de bacterias del proceso anaerobio anaerobio.

3. HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales son medios semi-terrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación que reúnen características biológicas, físicas y químicas que les confieren un elevado potencial auto-depurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie. (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los humedales artificiales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, adsorción y metabolismo bacterial. Los humedales operan casi a velocidades de flujo y caudal constante y están sujetos a drásticos cambios en la remoción de DBO, debido a los cambios en la temperatura del agua (Llaga y Guadalupe, 2006).

Los humedales artificiales se consideran una opción viable, en lo técnico y económico, para el tratamiento de aguas residuales. Su elevada eficiencia en la remoción de materia orgánica, nutrientes y

patógenos disminuye los impactos negativos al realizar los vertimientos sobre cuerpos receptores de agua.

Los sistemas de humedales más antiguos, los cuales han sido utilizados por más de 30 años, se encuentran en Holanda. Dichos sistemas están formados, generalmente, por zanjas de 3 m. de ancho y 100 m. de largo con una profundidad de 0.40 m, y las plantas sembradas son *Scirpus lacustris*, conocidas como Junco.

a) Tipos de humedales artificiales

Existen dos tipos: humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) y humedales artificiales de flujo superficial (HAFS). En el primero, HAFSS, el agua fluye debajo del medio filtrante. En el segundo, HAFS, el agua fluye sobre la superficie del medio filtrante. (Llagas y Guadalupe, 2006).

(1) Humedal artificial de flujo superficial (HAFS)

Estos sistemas consisten en mantener el flujo de agua por encima del medio filtrante. Generalmente, estos sistemas son diseñados con profundidades relativamente bajas, entre 30 cm. y 50 cm. La baja profundidad del agua, la baja velocidad del flujo y la presencia de tallos de planta regulan el flujo del agua residual. Sus ventajas respecto a los humedales de flujo subsuperficial (HAFSS) son el menor costo de inversión (ausencia del medio filtrante) y el valor ambiental que tiene como ecosistema acuático.

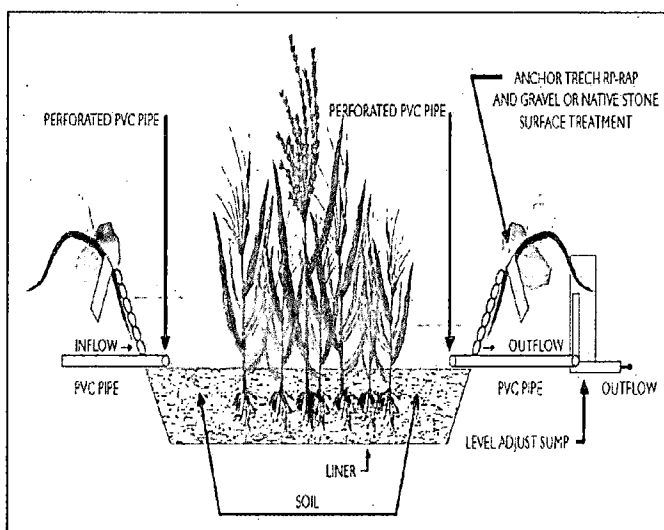


Gráfico II-03
Esquema humedal artificial de flujo superficial
 Adaptada de Llagas y Guadalupe (2006).

(2) Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS)

Estos sistemas consisten en mantener el flujo de agua por debajo del medio filtrante. Evidentemente, el mecanismo de acción de este tipo de humedales se asemeja a los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. También, estos sistemas son diseñados con profundidades relativamente bajas, entre 30 cm. y 50 cm. La baja profundidad del agua, la baja velocidad del flujo, la presencia del medio filtrante y vegetación regulan el flujo del agua residual. Sus ventajas respecto a los humedales de flujo superficial son la menor incidencia de malos olores, la menor probabilidad de aparición de vectores infecciosos, y el bajo riesgo de exposición directa entre el agua residual y las personas.

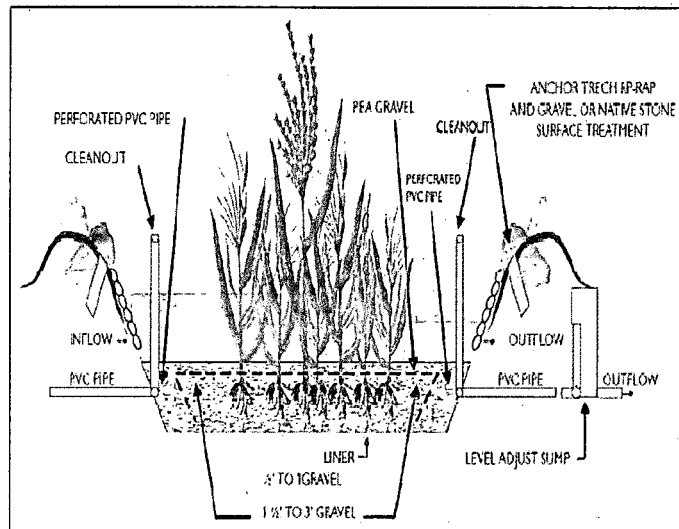


Gráfico II-04
Esquema humedal artificial de flujo subsuperficial
 Adaptada de Llagas y Guadalupe (2006).

b) Componentes de los humedales artificiales

Los componentes de los humedales artificiales son las plantas acuáticas, el medio filtrante y los microorganismos.

(1) Plantas acuáticas

Entre las plantas acuáticas, las especies más utilizadas en los humedales artificiales son las plantas macrófitas. Las especies de plantas que se introducen para crear un humedal dependen del tipo de humedal que se desea establecer. En este sentido, el clima, salinidad, profundidad y régimen de uso son los factores que van a definir las especies de plantas que serán introducidas. Las plantas macrófitas son capaces de soportar variaciones en el nivel de agua y poseen la cualidad de poder reproducirse en condiciones con bajos niveles de oxígeno disuelto (Ñique, 2000).

La función de mayor importancia de las macrófitas, en relación con el proceso de tratamiento de las aguas residuales, es el efecto físico que ellas producen. Las macrófitas estabilizan la superficie del medio filtrante y proporcionan, al sistema de humedales, condiciones para la buena filtración, transferencia de oxígeno, absorción de nutrientes y eliminación de contaminantes (Ingeniería hidráulica y ambiental, 2003).

Los procesos utilizados por las plantas para asimilar contaminantes son la fitoextracción, rizofiltración, fitoestabilización, fitoestimulación, fitovolatilización y fitodegradación. En primer lugar, en la fitoextracción, las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces). En segundo lugar, en la rizofiltración, las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados, y degradar compuestos orgánicos. De igual forma, en la fitoestabilización, las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire. Por un lado, en la fitoestimulación, los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos. Por otro lado, en la fitovolatilización, las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración. Por último, en la fitodegradación, las plantas captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.

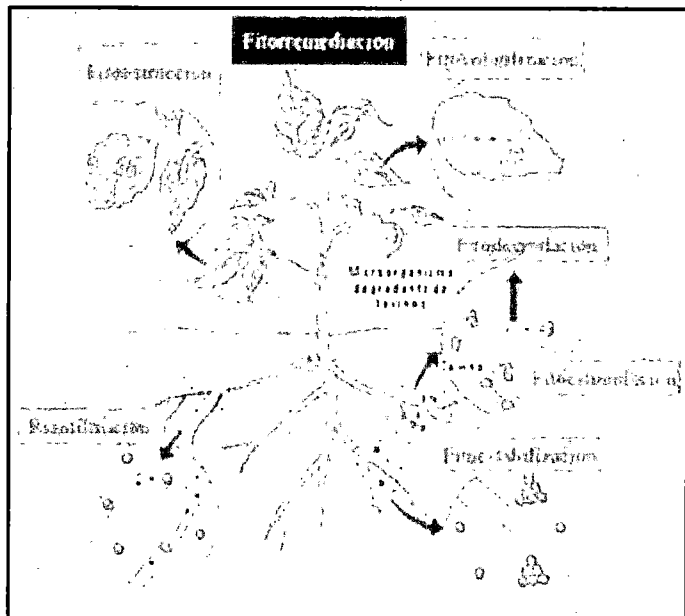


Gráfico II-05
Procesos de la fitorremediación
 Adaptada de fuente propia.

Las plantas más utilizadas son la familia *Scripus* cuyo nombre común es Junco. Esta familia se caracteriza porque penetra en medio filtrante y son capaces de crecer bajo condiciones ambientales adversas con gran facilidad de propagación.

(2) Medio filtrante (Sustrato)

El medio filtrante es un componente importante de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Por un lado, el metabolismo del proceso biológico tiene lugar en el sustrato. Por otro lado, la permeabilidad del medio filtrante afecta el movimiento del agua a través del humedal. Por último, el sustrato adsorbe, en su superficie, a los microorganismos presentes en el agua residual.

La principal característica del medio filtrante es que debe tener la permeabilidad suficiente para que el agua residual fluya a través de él. Esto obliga a utilizar sustrato de tipo granular como, por ejemplo, grava seleccionada con un diámetro de 1 pulgada. El tamaño del sustrato afecta directamente al flujo hidráulico del humedal artificial.

Por un lado, si el medio filtrante está constituido por arcilla y limo, aumenta la capacidad de absorción y filtración. La superficie específica es elevada y el diámetro del material filtrante es pequeño. En consecuencia, el caudal a tratar queda limitado, puesto que este medio presenta alta resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas.

Por otro lado, si el medio filtrante está constituido por grava y arena gruesa disminuye la capacidad de adsorción y filtración. Además, la superficie específica no es elevada y el diámetro del material filtrante no es pequeño. En consecuencia, aumenta la conductividad hidráulica. Asimismo, de forma indirecta, el sustrato de grava contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas. Aparte de ello, en las plantas también se adhieren colonias de microorganismos y forman la capa zoogléal o bioplícula. (Delgadillo et al., 2010).

(3) Microorganismos

El metabolismo es un conjunto de reacciones bioquímicas que permiten la transformación de los

nutrientes para formar energía o materia propia. Las transformaciones de los nutrientes y del carbono orgánico en humedales artificiales son debidas al metabolismo microbiano. Los microorganismos involucrados, principalmente, son bacterias, hongos y protozoarios (Mena et al., 2008).

Los microorganismos utilizan los nutrientes y el carbono como fuente de energía y fuente de nueva biomasa microbiana. La velocidad de crecimiento de la biomasa dependerá de las condiciones ambientales y de la superficie del material filtrante. La energía es obtenida por la oxidación de compuestos reducidos (dador de electrones) con un oxidante (aceptor de electrones) a través de la cadena respiratoria.

La mayoría de los procesos son llevados a cabo por bacterias heterótrofas y autótrofas. La degradación aerobia de la materia orgánica libera mayor energía que la nitrificación o cualquier otra degradación orgánica (Mena et al., 2008).

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios de carga orgánica en el agua residual. Asimismo, muchos microorganismos se inactivan, cuando las condiciones ambientales no son convenientes. La comunidad microbiana de un humedal puede ser afectada por sustancias tóxicas, pesticidas y metales pesados. Por ello, se debe prevenir que estas se introduzcan en las cadenas tróficas del proceso. (Mena et al., 2008).

c) *Biopelícula*

También conocida como la capa zoogleal. La biopelícula es el conglomerado de grupos complejos de microorganismos donde predominan las bacterias heterótrofas. Asimismo, la biopelícula está siempre presente en superficies expuestas al contacto con el agua, por ejemplo, en ríos, lagos, mares, sistemas de aguas subterráneas, canales de aguas residuales, entre otros. La capa zoogleal se relacionan particularmente con sistemas acuáticos con altos contenidos de nutrientes, especialmente en aguas residuales (Perez et al., 2006)

(1) Composición microbiológica de la biopelícula

Las especies de microorganismos dependen de varios factores: características del líquido residual a tratar, carga hidráulica, carga orgánica, disponibilidad de oxígeno, temperatura y pH. Las poblaciones microbianas son, usualmente, una mezcla muy compleja de diferentes géneros y especies de bacterias, hongos y protozoarios. En etapas iniciales del proceso se desarrollan poblaciones de bacterias del tipo filamentosas. En etapas posteriores, crecen otros microorganismos: bacterias nitrificantes, protozoos y rotíferos (Welter et al., 2004).

(2) Características de la biopelícula

Una de las principales características de la biopelícula es su heterogeneidad. Es decir, la biopelícula está conformada por una organización de colonias compuestas por diversas especies de microorganismos: bacterias, hongos y protozoos.

Los microorganismos al ser variados dentro de esta organización presentan diferentes microambientes de pH, tensión de oxígeno, concentración de iones, carbono y nitrógeno (Betancourth et al., 2004).

Otra característica importante de la biopelícula es su resistencia de agentes microbianos. Las colonias organizadas forman una capa impermeable. En la capa impermeable, solo los microorganismos más superficiales se ven ligeramente afectados (Betancourth et al., 2004).

(3) Propiedades físicas de la biopelícula

Las propiedades físicas más resaltantes de la biopelícula son el color, el aspecto y la densidad. Por un lado, el color es un indicativo de la biomasa formada. En las etapas iniciales del proceso biológico, la biopelícula tiene color amarronado-gris que es indicativo de una biomasa que remueve, principalmente, materia orgánica. En las etapas avanzadas, la biopelícula tiene color amarronado-rojizo que es característica de que predominan microorganismos nitrificantes. Por otro lado, la biomasa tiene dos aspectos: filamentosos y gelatinoso. El aspecto filamentosos corresponde a una biomasa en las etapas iniciales del proceso biológico; el aspecto gelatinoso, a una biomasa en las etapas avanzadas. Por último, la densidad de la biopelícula seca es una variable que se utiliza para correlacionarla con la difusividad relativa (capacidad para transmitir el agua). (Welter et al., 2004).

La capa zoogleal se genera cuando los microorganismos se van adhiriendo a las paredes del medio filtrante. Como el proceso se repite, las capas se sobrepone una encima de la otra. Evidentemente, la última capa, la externa, tiene más contacto con el agua residual y el oxígeno. En cambio, la capa adherida a la superficie de sustrato, la interna, tiene menos contacto con el agua residual y el oxígeno. Esto último genera que la capa zoogleal interna muera y se desprenda del material filtrante (Gómez, 2000).

d) Mecanismos de remoción de los contaminantes

Los principales mecanismos de remoción en los humedales artificiales se muestran en el siguiente cuadro.

Contaminantes	Mecanismos de eliminación
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación • Filtración
Materia orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación microbiana aerobia • Degradación microbiana anaerobia
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación. • Asimilación por parte de las plantas • Adsorción principal • Volatilización del amoníaco
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorción por parte del lecho • Asimilación por parte de las plantas
Metales	<ul style="list-style-type: none"> • Asimilación por parte de las plantas • Intercambio iónico
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación • Filtración • Muerte natural • Radiación ultravioleta

Cuadro II-03
Mecanismos de remoción en humedales artificiales.
 Adaptada de Mena et al., (2008).

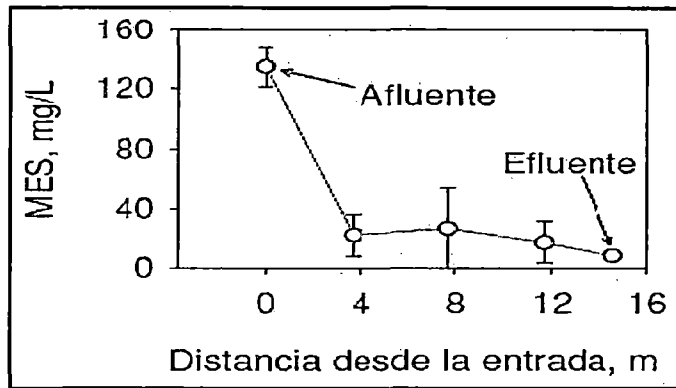
A continuación, se muestran los mecanismos de remoción evaluados en los humedales artificiales de la investigación.

(1) Remoción de la materia orgánica

La degradación de la materia orgánica, mediante vías aerobias, sucede cerca de la superficie del agua (en los primeros 10 cm) y en las zonas cercanas a las raíces. No obstante, en algunas zonas del humedal (las que tienen mayor profundidad), el oxígeno liberado por las raíces no alcanza para degradar completamente la materia orgánica. Estimaciones realizadas indican que la degradación de la materia orgánica se completa mediante procesos anaerobios. (García y Corzo, 2008).

(2) Remoción de sólidos suspendidos

La remoción de los sólidos suspendidos ocurre, parcialmente, en los tratamientos previos al humedal artificial. Los sólidos suspendidos que permanecen en el humedal son removidos por sedimentación y filtración. En los humedales de flujo horizontal, la mayor parte de la eliminación de los sólidos suspendidos sucede cerca de la zona de entrada. Asimismo, la concentración de estos va disminuyendo, de forma casi exponencial, a lo largo del humedal. En general, gran parte de la eliminación de los sólidos suspendidos sucede entre 1/4 y 1/3 de la longitud total del humedal artificial (García y Corzo, 2008).



Cuadro II-04
Materia en suspensión vs. distancia.
Adaptada de García y Corzo (2008).

Debido a la presencia de raíces y rizomas en el medio filtrante, se determinó que la remoción de sólidos suspendidos, en un humedal artificial de flujo subsuperficial, es muy eficiente. Asimismo, la eficiencia en remoción de los sólidos suspendidos también depende, en cierta medida, de la naturaleza del agua residual afluente. (Lahora, 2003).

e) Operación y mantenimiento

La operación y mantenimiento rutinarios de los humedales artificiales incluyen el control hidráulico y la profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, el corte de la hierba en bermas, la inspección de la integridad de las mismas, el manejo de la vegetación del humedal y el monitoreo rutinario de la calidad del agua (EPA, 2000).

El nivel de agua y el control de flujo son generalmente las únicas variables operacionales que tienen un impacto significativo sobre un humedal. Los cambios en los niveles de agua afectan la hidráulica, el tiempo de residencia, la difusión de oxígeno atmosférico en la fase de agua y la cubierta vegetal. Cambios significativos en los niveles de agua deben ser investigados de inmediato, ya que puede ser debido a fugas, obstrucción de las salidas, drenaje de aguas pluviales u otras causas (EPA, 2000).

El mantenimiento rutinario de la vegetación de los humedales no es necesario para los sistemas que funcionan dentro de sus parámetros de diseño. Se recomienda realizar la poda de las totoras cuando estas alcancen por lo menos 3 m de altura, mediante una hoja de sierra o una navaja de mano. El objetivo primordial en la gestión de la vegetación es que la planta mantenga su crecimiento normal; se logra evitando cambios en el nivel de agua mediante el proceso de operación (EPA, 2000).

4. TUBO DE PVC CORRUGADO

El tubo de PVC corrugado es utilizado, por sus aplicaciones y características técnicas, como material en instalaciones de sistemas eléctricos. Este material está diseñado para alojar y proteger cables en la instalación eléctrica. En primer lugar, entre sus aplicaciones más frecuentes se encuentran las canalizaciones embutidas de todo tipo, tanto en obras húmedas como secas. Por un lado, en las obras húmedas, se realizan embutidos en paredes, bajo pisos técnicos y techos. Sin embargo, este no es apto para losas de hormigón puro. Por otro lado, en obras secas, se realizan embutidos en techos, paredes o tabiques de hormigón pre-moldeado con previsión de huecos o canales. En segundo lugar, entre las características técnicas del material se encuentran que es termoplástico, aislante, biodegradable, con alto nivel de flexibilidad, resistente a la compresión (32 kg), soporta variaciones de temperatura (de -5°C a $+60^{\circ}\text{C}$). Finalmente, como propiedad intensiva del material, el PVC tiene un calor específico equivalente a 1500 J/Kg.K

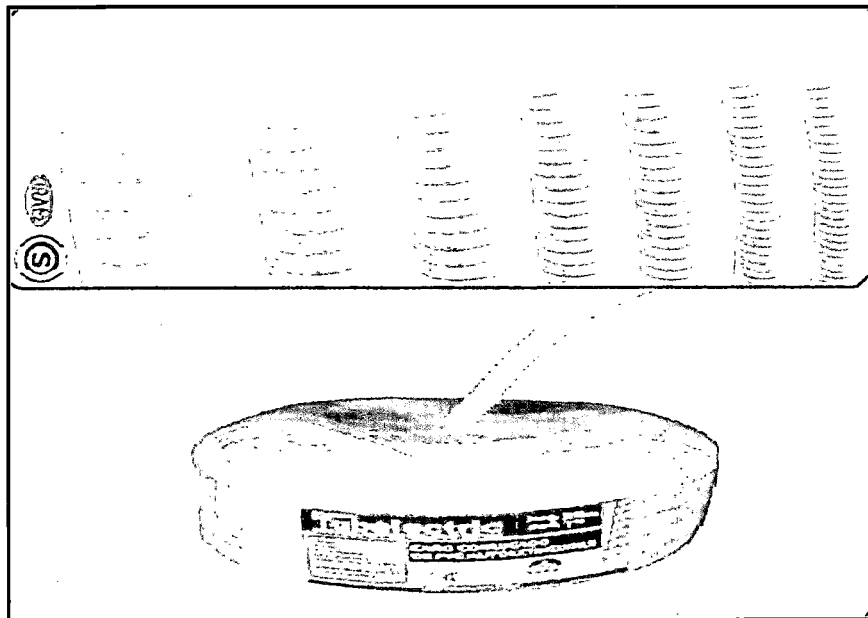


Gráfico II-06
Muestra del tubo de PVC corrugado

Adaptada de fuente propia.

5. GRAVA

Se denomina grava a las rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 milímetros. La grava es utilizada, por sus aplicaciones y características técnicas, principalmente, como material de construcción civil, en humedales artificiales, entre otros. Por otro lado, la grava como fuente de abastecimiento, se encuentra en los siguientes puntos: bancos de sedimentación, cauce de ríos, pozos secos y canteras. Los bancos de sedimentación son bancos construidos artificialmente para embancar el material fino-grueso que arrastran los ríos. El cauce de ríos corresponde a la extracción desde el lecho del río, en los cuales se encuentra material arrastrado por el escurrimiento de las aguas. Los pozos secos son zonas de antiguos rellenos aluviales en valles cercanos a ríos. Las canteras es el lugar de explotación de los mantos rocosos o formaciones geológicas, donde los materiales se extraen, usualmente, desde cerros. Finalmente, como propiedad intensiva del material, la grava tiene un calor específico equivalente a 910 J/Kg.K.

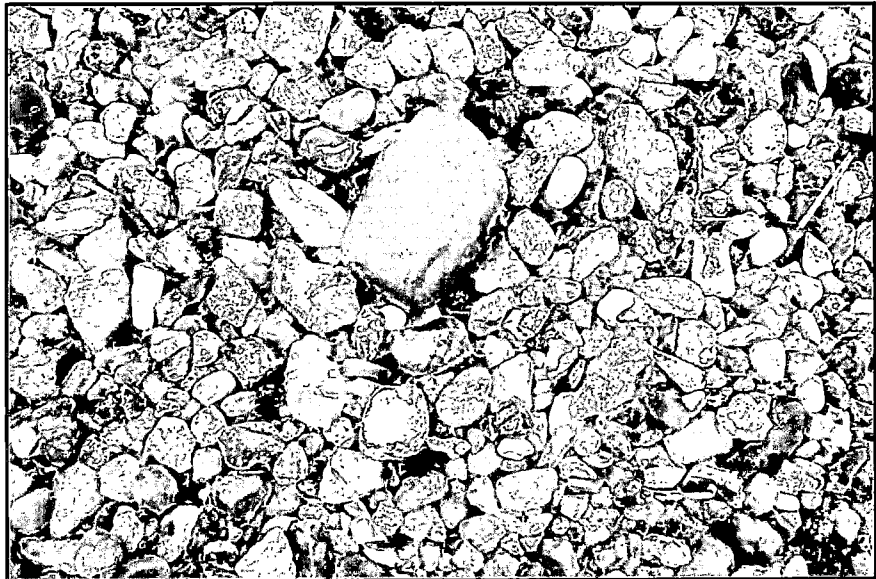


Gráfico II-07
Muestra de gravas de diámetros entre 1 pulgada y 1.5 pulgadas
Adaptada de fuente propia.

C. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Investigaciones realizadas han demostrado que el uso de lechos filtrantes de material sintético, con forma particular, tienen, en los humedales artificiales, una eficiencia mayor que los lechos filtrantes de grava.

D. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

1. VARIABLES INDEPENDIENTES

- Influencia de los materiales filtrantes, PVC corrugado y grava.
- Calidad del agua residual afluyente de los humedales artificiales.

2. VARIABLES DEPENDIENTES

- Remoción de materia orgánica en humedales artificiales.
- Calidad del agua residual efluente de los humedales artificiales.

3. VARIABLES INTERVINIENTES

- Diseño de los humedales artificiales.
- Condiciones climatológicas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

A. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El sistema de humedales se ubicó en el Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-UNI), en la zona norte del campus de la Universidad Nacional de Ingeniería.



Gráfico III-01
Ubicación de la investigación durante el periodo de operación
Adaptada de Google Earth (2014).

B. DESCRIPCION DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación desarrolló un tratamiento secundario basado en dos humedales artificiales con los materiales filtrantes, grava y PVC corrugado, un material filtrante por humedal artificial. El sistema de humedales tuvo como agua residual afluyente el agua residual efluente de un Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (RAMLFA), ubicado en CITRAR-UNI. Evidentemente, CITRAR-UNI es una planta piloto de

tratamiento de aguas residuales domésticas, la cual recibe el agua residual proveniente de las viviendas que se encuentran en la zona periférica. El agua residual ingresa a la planta a través de la unidad de captación; luego, es conducida hacia el pre-tratamiento compuesto por una cámara de rejillas y un desarenador. Después, el efluente del desarenador ingresa a la unidad de tratamiento primario avanzado, el RAMLFA. Posteriormente, el efluente del RAMLFA es conducido hacia un tanque de almacenamiento. En ese momento, inicia la investigación a través del sistema de humedales.

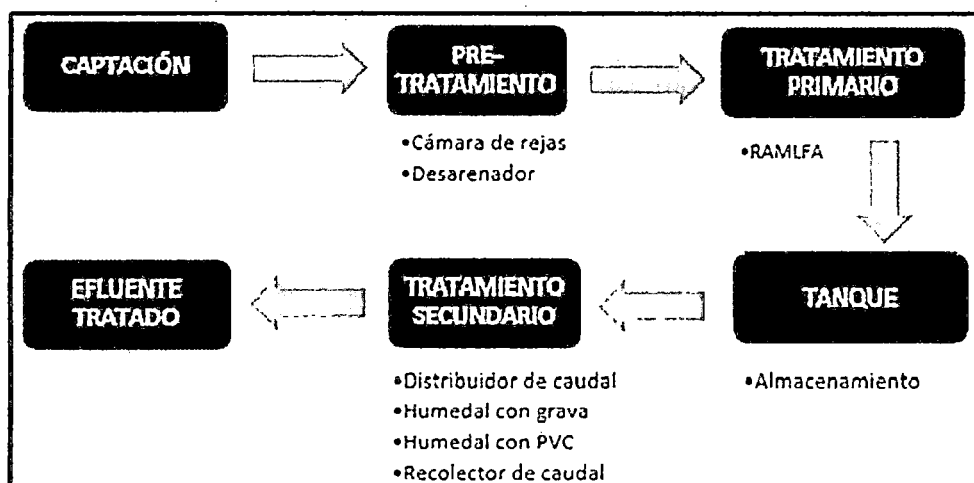


Gráfico III-02
Recorrido del agua residual en el sistema de tratamiento.
 Adaptada de fuente propia (2014).

El sistema de humedales se implementó, en CITRAR-UNI, mediante un tanque de almacenamiento, un sistema distribuidor de caudal, dos humedales artificiales (operando en paralelo) y un recolector de caudal. El tanque de almacenamiento aseguró un caudal de ingreso permanente en el sistema de humedales. El distribuidor de caudal repartió el agua residual, equitativamente, a los humedales artificiales. Estos estuvieron sometidos a iguales condiciones de diseño; sin embargo, estuvieron compuestos por un material filtrante diferente en cada humedal artificial. Por otro lado, el recolector de caudal condujo los efluentes a la red de alcantarillado.

1. TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El tanque de almacenamiento almacenó el agua residual, proveniente del reactor RAMLFA, para asegurar un caudal de ingreso constante y abastecer a los humedales artificiales, durante el periodo de operación. El tanque tuvo 1100 litros de capacidad y fue llenado mediante un sistema de bombeo.

2. DISTRIBUIDOR DE CAUDAL

El distribuidor de caudal fue un dispositivo ubicado a la salida del tanque de almacenamiento para repartir, de manera equitativa, el caudal de ingreso a los humedales artificiales. Este dispositivo fue el responsable de regular el ingreso del agua residual a los humedales artificiales, en cantidad y continuidad uniforme. El distribuidor de caudal fue elaborado, de manera artesanal, mediante piezas de PVC de diámetro $\varnothing \frac{1}{2}$ " : nipples y accesorios.

3. HUMEDALES ARTIFICIALES

Conectados al distribuidor de caudal, los humedales artificiales recibieron el agua residual operando en paralelo. Además, estos fueron sometidos a iguales condiciones de temperatura, diseño, caudal y calidad de afluente durante el periodo de operación. Las estructuras de los humedales artificiales, fueron dos cajas de plástico megaforte #200 de grandes dimensiones: 0.86 m. de largo, 0.52 m. de ancho y 0.40 m. de alto. Sin embargo, la diferencia de los humedales fue que un humedal contenía grava, como material filtrante; y el otro, PVC corrugado.

4. RECOLECTORES DE CAUDAL

El recolector de caudal reunió los efluentes de los humedales y los condujo, como disposición final, a la red de alcantarillado externa.

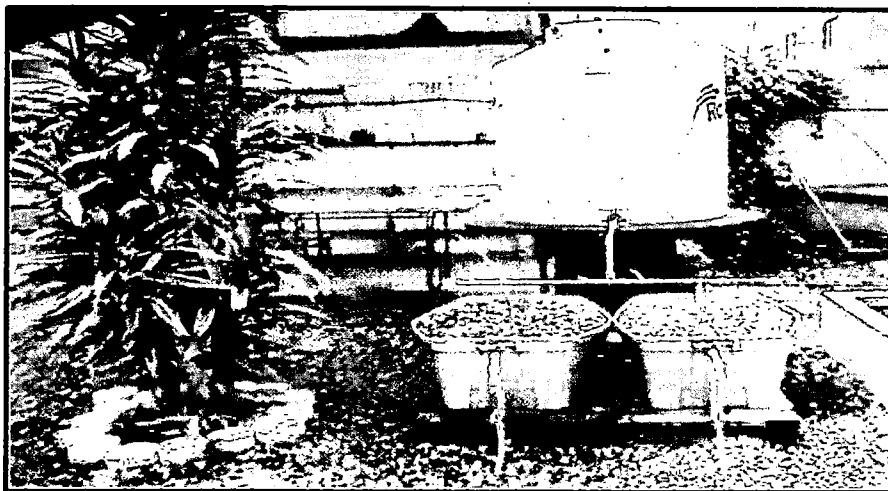


Gráfico III-03
Humedales artificiales durante la operación del sistema
Adaptada de fuente propia (2014).

C. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

1. TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Se adquirió un tanque Rotoplás con capacidad de 1100 L. Luego, se colocó el tanque sobre un soporte, de manera el tanque tuvo una altura apropiada para el funcionamiento del sistema de humedales.

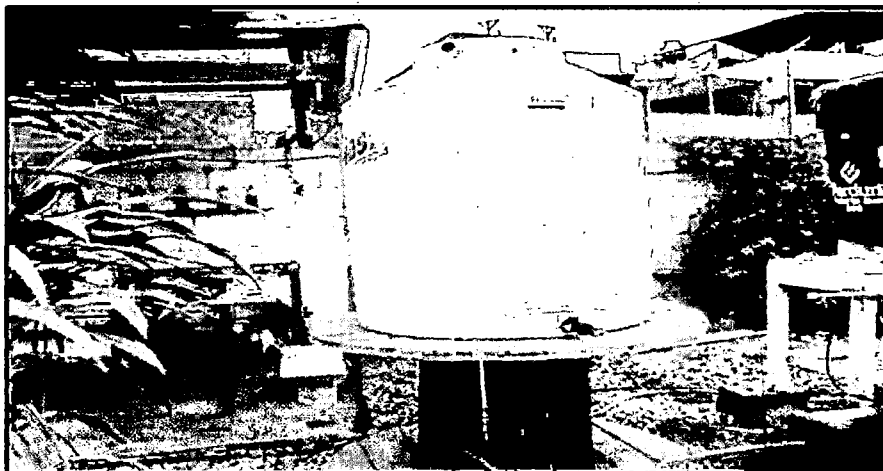


Gráfico III-04
Tanque de almacenamiento del sistema de humedales
Adaptada de fuente propia (2014).

2. DISTRIBUIDOR DE CAUDAL

Se realizó, artesanalmente, la construcción del distribuidor de caudal a través de piezas de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada. Asimismo, con la finalidad de lograr una distribución homogénea del caudal de ingreso, a lo ancho del humedal, el diseño del distribuidor de caudal fue un tubo perforado con orificios distribuidos cada 3 cm.

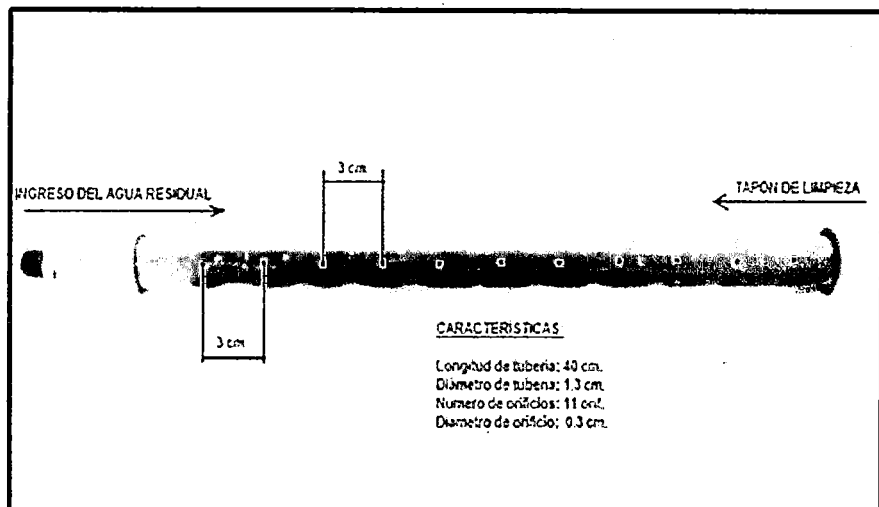


Gráfico III-05
Tubo perforado del distribuidor de caudal
 Adaptada de fuente propia (2014).

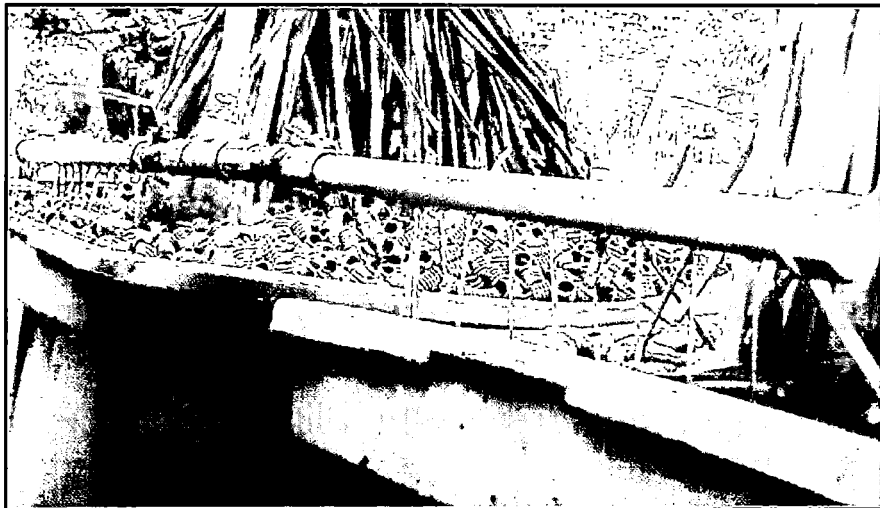


Gráfico III-06
Distribuidor de caudal del sistema de humedales
 Adaptada de fuente propia (2014).

3. HUMEDALES ARTIFICIALES

Se utilizaron dos cajas de plástico megaforte #200, marca REY, de dimensiones: 0.86 m. de largo, 0.52 m. de ancho y 0.40 m. de alto. En la parte frontal inferior, las cajas de plástico fueron adaptadas, mediante niples y accesorios, para que las estructuras se comporten, hidráulicamente, como humedales artificiales.

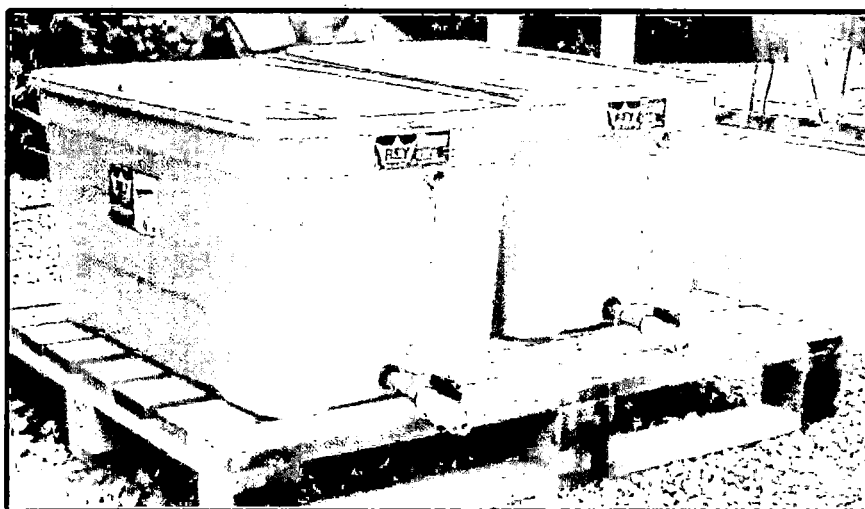


Gráfico III-07
Estructura de los humedales artificiales
Adaptada de fuente propia (2014).

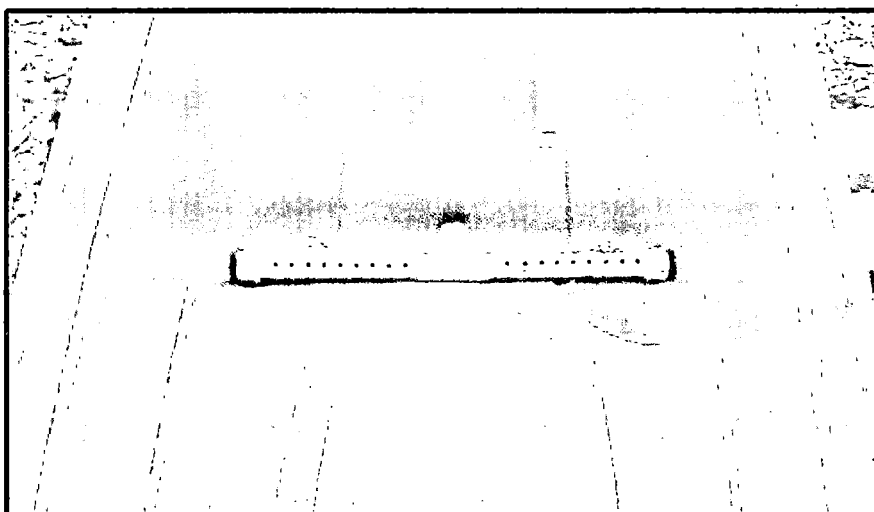


Gráfico III-08
Interior de la parte frontal inferior del humedal artificial
Adaptada de fuente propia (2014).

Luego, se colocaron los materiales filtrantes, en las estructuras de los humedales artificiales, en una, grava y, en la otra, PVC corrugado, ambos con 40 cm. de altura.



Gráfico III-09
Humedales artificiales con sus materiales filtrantes
Adaptada de fuente propia (2014).

Mientras que se colocaban el material filtrante, en la estructura con PVC corrugado, se insertó una malla de plástico para evitar que el material flote. La fuerza de flotación se produjo porque el peso específico del material filtrante PVC corrugado fue menor que el peso específico del agua residual.



Gráfico III-10
Malla plastificada en el humedal artificial con PVC corrugado
Adaptada de fuente propia (2014).

Asimismo, a 10 cm. del borde de la superficie, se plantaron tres raíces de Typha, también conocida como Totora, que estuvieron, uniformemente, distribuidas a lo largo de cada humedal artificial.



Gráfico III-11
Raíces de Totora plantadas en los humedales artificiales
Adaptada de fuente propia (2014).

4. RECOLECTOR DE CAUDAL

El recolector de caudal fue un conducto, conectado a la salida de los humedales que llevó el efluente a la red de alcantarillado.

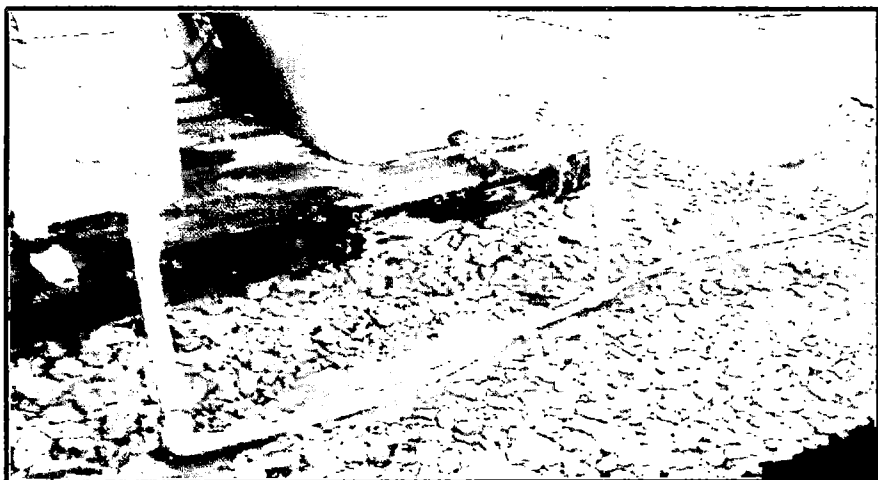


Gráfico III-12
Recolector de caudal de los humedales artificiales
Adaptada de fuente propia (2014).

D. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

1. MATERIAL FILTRANTE

Los materiales filtrantes fueron grava y PVC corrugado. Por un lado, las gravas tuvieron diámetros mayores entre 1 pulg. y 1.5 pulg. con superficie específica de 240 m²/m³. Por otro lado, los niples de PVC corrugado, con superficie específica de 995 m²/m³, tuvieron las dimensiones: 1.5 cm de largo y 1.5 cm de diámetro.

En consecuencia, las características de los materiales filtrantes fueron las siguientes:

- Diámetro GRAVA = 0.032 m
- Diámetro PVC = 0.015 m
- Sup. esp. GRAVA = 240 m²/m³
- Sup. esp. PVC = 995 m²/m³

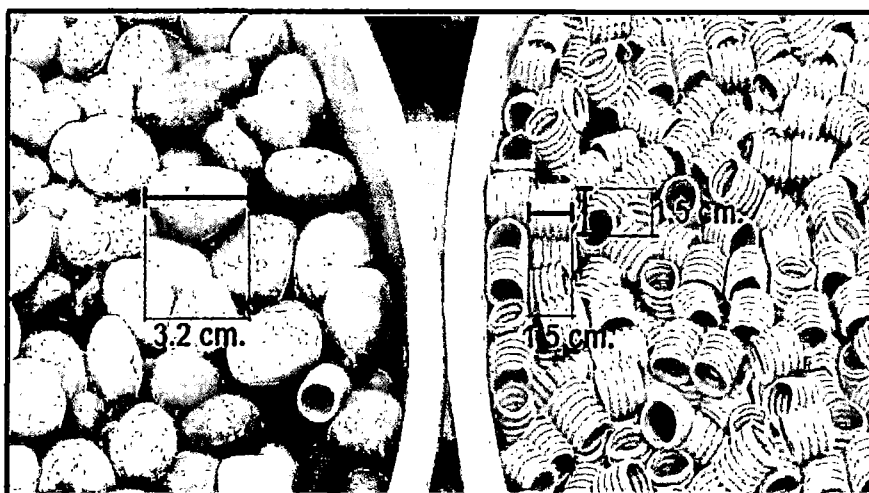


Gráfico III-13
Materiales filtrantes: grava y PVC corrugado
Adaptada de fuente propia (2014).

2. POROSIDAD

La porosidad es la relación, expresada en porcentaje, del volumen de espacios vacíos sobre el volumen total del humedal artificial.

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{\text{Volumen de espacios vacíos}}{\text{Volumen total}}$$

Dónde:

- Volumen de espacios vacíos: Volumen donde el agua residual fluye, libremente, a través del material filtrante.
- Volumen total: Volumen que ocupa el humedal artificial.

La porosidad está en función de las características del material filtrante del humedal artificial. Por ello, para calcular el volumen de espacios vacíos, se saturó el medio filtrante del humedal artificial con agua. El volumen de saturación fue el volumen de espacios vacíos. Asimismo, para calcular el volumen total, se utilizaron las dimensiones del humedal artificial, largo, alto y ancho. Sin el material filtrante, este se llenó de agua hasta llegar al nivel máximo de altura del medio filtrante. En ambos procedimientos, mientras que se vertía el agua, se calculaba el volumen de agua utilizado. Por un lado, en el humedal artificial con grava, el volumen de espacios vacíos fue 46.6 litros. Por otro lado, en el humedal artificial con PVC corrugado, el volumen de espacios vacíos fue 103.8 litros. Por último, el volumen total del humedal artificial fue 129.0 litros.

En consecuencia, las porosidades de los humedales artificiales fueron las siguientes:

- **Porosidad** GRAVA = **36.10%**
- **Porosidad** PVC = **80.50%**

3. CAUDAL DE INGRESO

El caudal de ingreso se midió realizando aforo volumétrico en el afluente de los humedales artificiales. Debido a que las condiciones del sistema de humedales fueron a escala de laboratorio, el caudal de ingreso se consideró 2 ml/seg en cada humedal artificial.

- Caudal de ingreso _{GRAVA} = 2 ml/seg
- Caudal de ingreso _{PVC} = 2 ml/seg

4. CAUDAL DE SALIDA

El caudal de salida se midió realizando aforo volumétrico en el efluente de los humedales artificiales. Durante el periodo de operación, el caudal promedio de salida en el humedal artificial con PVC corrugado fue 1.3 ml/seg, mientras que en el humedal artificial con grava fue 1.1 ml/seg.

- Caudal de salida _{GRAVA} = 1.1 ml/seg
- Caudal de salida _{PVC} = 1.3 ml/seg

5. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Esta se calculó mediante la diferencia entre el caudal de ingreso y el caudal de salida. Dado que el material de las estructuras de los humedales artificiales fue impermeable, no existió pérdida de agua residual por infiltración.

6. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la relación del volumen de espacios vacíos sobre el caudal promedio del humedal artificial.

$$TRH = \frac{\text{Volumen de espacios vacíos}}{\text{Caudal promedio}}$$

Dónde:

- Volumen de espacios vacíos: Volumen donde el agua residual fluye, libremente, a través del material filtrante.
- Caudal promedio: Media aritmética del caudal de ingreso y salida.

Naturalmente, el tiempo de retención hidráulico es propio de cada diseño, dado que este depende del volumen de espacios vacíos de cada humedal artificial; y este, a la vez, de sus porosidades respectivas. Por consiguiente, se tuvo dos TRH, por un lado, en el humedal artificial con grava, el TRH fue 6.5 horas y, por otro lado, en el humedal artificial con PVC corrugado, el TRH fue 14.5 horas.

En consecuencia, los tiempos hidráulicos de retención de los humedales artificiales fueron los siguientes:

- **TRH_{GRAVA} = 6.5 horas**
- **TRH_{PVC} = 14.5 horas**

7. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica (K) es la capacidad que tiene un medio filtrante para transmitir un flujo de agua a través de una sección transversal. Esta puede ser calculada mediante un enfoque empírico, dado que, en el año 1986, I.E. Idelchik, científico inglés, propuso una ecuación que la predice. La ecuación de I.E. Idelchik está en función de los siguientes parámetros: "ρ" que es la densidad del fluido (kg/m³), "g" que es la aceleración de la gravedad (m/s²), "n" que es la porosidad (fracción), "D" que es el diámetro de la partícula (m) y "μ" que es la viscosidad del agua (kg/m/d). Por lo tanto, para calcular la conductividad hidráulica, se utilizó la ecuación de I.E. Idelchik.

$$K = \frac{\rho * g * n^{3.7} * D^2}{12.75 * (1 - n) * \mu}$$

Dónde:

ρ agua =	1100	kg/m ³
g ac. =	7.32*10 ¹⁰	m/d ²
n GRAVA =	0.361	fracción
n PVC =	0.805	fracción
D GRAVA =	0.032	m
D PVC =	0.015	m
μ agua =	129.6	kg/m/d

En consecuencia, las conductividades hidráulicas de los humedales artificiales fueron las siguientes:

➤ K GRAVA	=	18,011.4 m/d
➤ K PVC	=	252,096.4 m/d

8. CARGA HIDRÁULICA

La carga hidráulica es el cociente entre el caudal de entrada y el área superficial del humedal artificial. Asimismo, la carga hidráulica se define como el equivalente en lluvia del flujo que se está estudiando. No implica la distribución uniforme del agua sobre toda la superficie del humedal (Kadlec y Knight, 1995).

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{\text{Caudal de ingreso}}{\text{Área superficial}}$$

Dónde:

- Caudal de ingreso: 2 ml/seg.
- Área superficial: Superficie que abarca el medio filtrante, según el producto largo por ancho, que fue 0.45 m².

En consecuencia, la carga hidráulica fue la siguiente:

$$\text{➤ Carga hidráulica} = 0.38 \text{ m/día}$$

9. CARGA ORGÁNICA

La carga orgánica es la cantidad de materia orgánica en agua residual, proveniente del producto de la concentración de DBO₅ por el caudal de ingreso.

$$\text{Carga orgánica} = \text{Caudal} * \text{DBO}_5$$

Dónde:

- Caudal de ingreso: 2 ml/seg.
- DBO₅ afluente: 126 mg/L, en promedio

En consecuencia, la carga orgánica fue la siguiente:

$$\text{➤ Carga orgánica} = 21.8 \text{ g/día}$$

E. MONITOREO DE LA INVESTIGACIÓN

El monitoreo de la investigación incluyó, por un lado, la recolección de la muestra de agua residual, en los puntos de monitoreo, para el análisis de los parámetros de calidad del agua residual. Por otro lado, incluyó la frecuencia de monitoreo durante el periodo de operación; y, por último, la implementación de las mejoras técnicas en el sistema de humedales.

1. PUNTOS DE MONITOREO.

En el diseño de la investigación se establecieron tres puntos de monitoreo. El primer punto de monitoreo, denominado punto E-0, fue en la entrada de los humedales artificiales. Evidentemente, el punto E-0 es único, dado que la muestra de agua residual tomada al lado derecho, izquierdo o de ambos lados es de la misma calidad. El segundo punto de monitoreo, denominado punto H-1, fue en la salida del humedal artificial con grava. El tercer punto de monitoreo, denominado punto H-2, fue en la salida del humedal artificial con PVC corrugado. Asimismo, las calidades del efluente, puntos H-1 y H-2, dependieron del proceso biológico de cada humedal artificial.

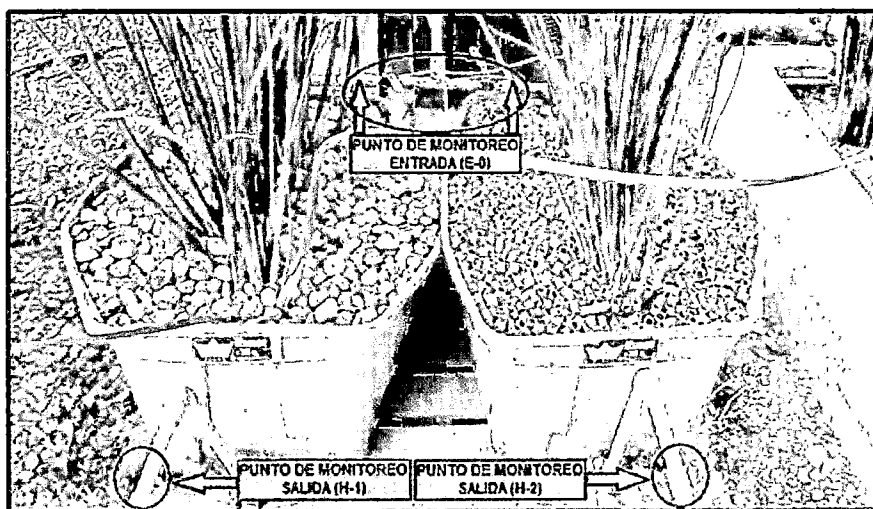


Gráfico III-14
Puntos de monitoreo de los humedales artificiales
Adaptada de fuente propia (2014).

2. PARAMETROS CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL

Los parámetros de calidad del agua residual fueron los siguientes: turbiedad, temperatura, pH, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, sólidos suspendidos fijos, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno.

a) *Turbiedad*

La determinación de la turbiedad se realizó en las instalaciones del laboratorio del CITRAR-UNI bajo la siguiente modalidad:

Descripción: 2130 B Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA.

Método: Nefelométrico

Materiales: Celda turbidimétrica, vaso precipitado 50 ml, pipeta y bagueta.

b) *Temperatura*

La determinación de la temperatura se realizó en las instalaciones del laboratorio del CITRAR-UNI bajo la siguiente modalidad:

Descripción: 2550 B Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA.

Método: Termómetro Celsius de Mercurio

Materiales: Vaso precipitado de 50 ml

c) *pH*

La determinación del pH se realizó en las instalaciones del laboratorio del CITRAR-UNI bajo la siguiente modalidad:

Descripción: 4500-H+ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA.

Método: Electrométrico

Materiales: Potenciómetro de campo

d) Sólidos suspendidos.

La determinación de los sólidos suspendidos se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Investigación del Agua de la universidad bajo la siguiente modalidad.

Descripción: 2524 D Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF.

Método: Secados a 103°C - 105°C

Materiales: Cápsulas, probetas, plancha de calentamiento, estufa de 0°C a 180°C, mufla de 0° a 1000°C, embudos y papel filtro Wattman N° 40, porta embudo, desecador y pinza para cápsula.

e) Demanda química de oxígeno

La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó, en las instalaciones del laboratorio del CITRAR-UNI bajo la siguiente modalidad.

Descripción: 5220 C Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF.

Método: Titulométrico de reflujo cerrado

Materiales: Pipeta, gradillas, equipo espectrofotómetro, reactor digestor, papel tissue.

f) Demanda bioquímica de oxígeno

La determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) se realizó, en las instalaciones del Laboratorio de Investigación del Agua de la universidad bajo la siguiente modalidad.

Descripción: 5210 B Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF.

Método: Prueba al quinto día DBO

Materiales: Frascos Winkler para OD, pipeta 10 ml, fiola 200 ml, bureta soporte universal, incubadora, soluciones de cloruro férrico, cloruro cálcico, sulfato de magnesio y tampón de fosfato.

3. PERIODO DE OPERACION

Los humedales artificiales funcionaron, continuamente, durante siete meses. El sistema de humedales inició su operación el 26 de agosto de 2013 y la finalizó el 07 de marzo de 2014. Durante ese tiempo, se establecieron dos periodos de operación: periodo de letargo y periodo de evaluación.

El periodo de letargo, de la semana 01 a la semana 03, se inició el 26 de agosto de 2013. El tiempo estipulado para este periodo fue tres semanas, debido a que, durante ese tiempo, evaluando la turbiedad, parámetro que se relaciona con la remoción de la materia orgánica, no se observó un incremento significativo en la remoción del parámetro hasta la semana 04. Este hecho advirtió que se daba inicio al proceso biológico en los humedales artificiales. En consecuencia, el periodo de letargo había terminado.

El periodo de evaluación, de la semana 04 a la semana 28, se inició el 16 de setiembre de 2013. El tiempo estipulado para este periodo fue veinticuatro semanas, seis meses. Durante ese tiempo, se realizó la evaluación de los parámetro de calidad del efluente residual provenientes de los puntos de monitoreo. Este periodo terminó el 07 de marzo de 2014.

4. FRECUENCIA DE MONITOREO

La frecuencia de monitoreo fue continúa durante el funcionamiento del sistema de humedales. El monitoreo se realizó con el fin de evaluar los parámetros de calidad del efluente residual. Sin embargo, la frecuencia de monitoreo estuvo en función de los parámetros de calidad del agua residual. Asimismo, el monitoreo de los parámetros fue, para un grupo, diario y, para otro grupo, semanal.

Por un lado, los parámetros turbiedad, temperatura y pH tuvieron una frecuencia de monitoreo diaria. El monitoreo se realizó de lunes a viernes, alrededor de las 10 de la mañana. Este fue diario, debido a que los parámetros eran propensos a una mayor variación de su magnitud durante el día y los equipos de monitoreo tenían mayor disponibilidad.

Por otro lado, los parámetros sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, sólidos suspendidos fijos, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno tuvieron una frecuencia de monitoreo semanal. El monitoreo se realizó los miércoles de cada semana, en la mañana. Este fue semanal, debido a que los parámetros requerían un procedimiento de análisis complejo y los equipos de monitoreo requerían un permiso especial.

5. IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS TÉCNICAS

a) *En el sistema de almacenamiento*

Durante el periodo de letargo, se observó que el tanque de almacenamiento se llenó de manera variable. Es decir, el caudal de ingreso al sistema de humedales fue continuo pero no se consideró una frecuencia de llenado constante, ya que, en las primeras semanas, la prioridad fue iniciar el proceso biológico.

Por consiguiente, en el periodo de evaluación, se estableció una frecuencia de llenado constante. Dado que el tanque de almacenamiento tuvo capacidad útil de 1100 litros y el caudal de diseño fue de 2 ml/s, se estimó que en 48 horas el tanque quedaba vacío. En consecuencia, de manera permanente, el llenado del tanque de almacenamiento se realizó cada dos días.

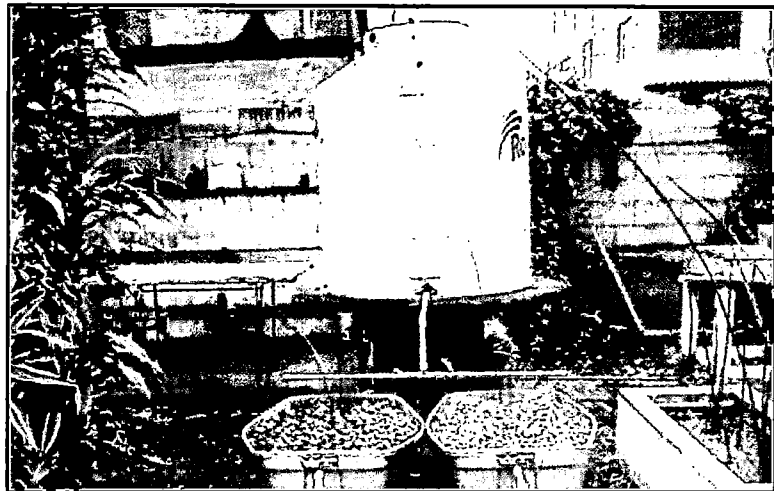


Gráfico III-15
Tanque de almacenamiento
Adaptada de fuente propia (2014).

b) En el sistema de distribución del caudal

Durante el periodo de operación, se observó que en los orificios del tubo perforado quedaban retenidas partículas de materia orgánica. Estas partículas generaban obstrucciones al paso del agua residual; en consecuencia, el caudal de ingreso a los humedales artificiales, con el tiempo, era menor que el caudal de diseño. Naturalmente, las variaciones de caudal pudieron afectar la eficiencia del proceso biológico.

Por consiguiente, dado que las partículas de materia orgánica, frecuentemente, quedaban retenidas en los orificios, se realizó, semanalmente, la limpieza del sistema de distribución de caudal.

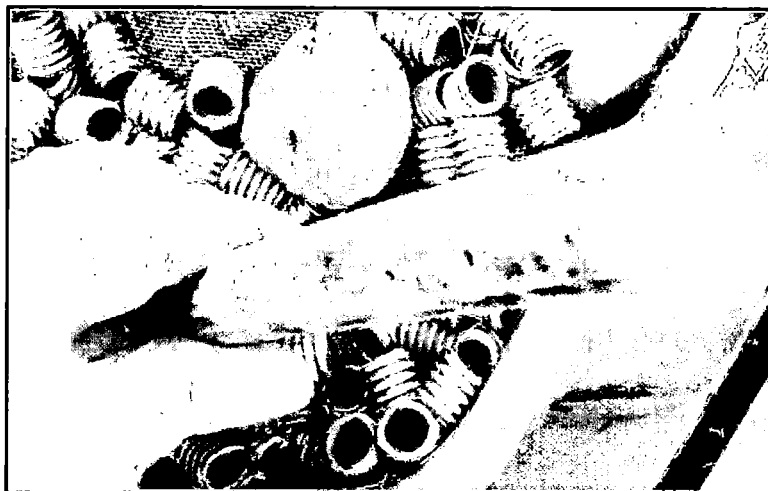


Gráfico III-16
Tubo perforado con materia orgánica en orificios
Adaptada de fuente propia (2014).

c) En el sistema de recolección de caudal

Durante el periodo de letargo, se observó que se formaron partículas de color blanco alrededor de las paredes internas de la boquilla de salida de los efluentes de los humedales

artificiales. Las partículas de color blanco pudieron ser las precipitaciones de los sulfuros y/o la materia en forma de masa gelatinosa. Por un lado, los sulfuros pudieron generarse, principalmente, por la oxidación del sulfuro de hidrógeno. El sulfuro de hidrógeno, componente del biogás, fue un subproducto de las reacciones bioquímicas del proceso anaerobio de los humedales artificiales. Por otro lado, la materia en forma de masa gelatinosa pudo producirse, esencialmente, por el crecimiento de microorganismos bajo las condiciones establecidas. Evidentemente, la presencia de las partículas de color blanco, adheridas a las paredes internas de la boquilla de salida, pudo afectar la calidad de las muestras de los efluentes residuales.

Por consiguiente, debido a que, frecuentemente, las partículas de color blanco se formaron en la boquilla de salida, se realizó la limpieza del sistema de recolección de caudal semanalmente.



Gráfico III-17
Boquilla con partículas blancas en las paredes internas
Adaptada de fuente propia (2014).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de la investigación, durante el periodo de operación, de la semana 01 a la semana 28, se registraron por parámetros. Los registros muestran el comportamiento de la magnitud de los parámetros turbiedad, temperatura, pH, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) a través del tiempo. Estos registros indicaron la fecha, hora, magnitud y eficiencia de los parámetros en el monitoreo de la investigación.

Durante el periodo de operación, que incluye el periodo de letargo, de la semana 01 a la semana 03, y el periodo de evaluación, de la semana 04 a la semana 28, se analizaron los parámetros de calidad del agua residual mencionados. Sin embargo, solamente, durante el periodo de letargo, se consideraron los parámetros turbiedad, temperatura y pH, debido a que, en ese tiempo, las magnitudes de los demás parámetros relacionados a la remoción de materia, como la DBO₅, DQO y los sólidos suspendidos, no tenían un valor significativo, dado que, en ese tiempo, la remoción de la materia orgánica en los humedales artificiales era inapreciable. Se estima que la remoción de la materia orgánica se inició alrededor de la semana 03. De igual forma, en las semanas 08, 09, 16, 17, 18 y 19, por motivos técnicos, solamente, se consideraron los parámetros turbiedad, temperatura y pH.

En los resultados, se analizaron las magnitudes y eficiencias de los parámetros. Es decir, se dio la interpretación al comportamiento de los valores máximo, mínimo y promedio, así como, de la desviación estándar, que permite determinar la variación de los datos respecto al valor promedio, de las magnitudes y eficiencias de los parámetros.

A. REGISTRO DE LA TURBIEDAD

La turbiedad es el parámetro que, en el agua residual, se relaciona con la presencia de materia orgánica. Asimismo, este es proporcional a la concentración de materia en suspensión. Es decir, la turbiedad mide la apreciación de la abundancia de las partículas en suspensión. Entonces, la turbiedad es mayor cuanto mayor es la contaminación del agua residual. Por consiguiente, se considera un indicador de interés en el tratamiento de aguas residuales

1. RESULTADO DE LA TURBIEDAD

Según el registro de la turbiedad, durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio, para la magnitud y la eficiencia de la turbiedad, en cada punto de monitoreo.

En el periodo de letargo, para la magnitud y eficiencia de la turbiedad, se obtuvieron altos y bajos valores respectivamente. Por un lado, para la magnitud de la turbiedad, en el afluente de los humedales artificiales, punto de monitoreo E-0, se alcanzaron valores comprendidos entre 100 NTU y 60 NTU disminuyéndose, gradualmente, en el tiempo; en los efluentes de los humedales artificiales, puntos de monitoreo H-1 y H-2, se alcanzaron valores comprendidos entre 75 NTU y 35 NTU disminuyéndose, gradualmente, en el tiempo. Por otro lado, para la eficiencia de la turbiedad; en el humedal artificial con GRAVA, punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores comprendidos entre 20% y 35% incrementándose, gradualmente, a una tasa de 5.0% por semana; en el humedal artificial con PVC, punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores comprendidos entre 25% y 50% incrementándose, gradualmente, a una tasa de 8.3% por semana.

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de la turbiedad, se obtuvieron valores con una tendencia, en aumento, cuasi constante a través del tiempo. Por un lado, para la magnitud de la turbiedad, en el punto de monitoreo E-0, afluente de los humedales artificiales, se alcanzaron valores máximo de 103.1 NTU, mínimo de 52.6 NTU y promedio de 80.1 NTU; asimismo, la desviación estándar fue 11.45 NTU. En el punto de monitoreo H-1, efluente del humedal artificial con GRAVA, se alcanzaron valores máximo de 56.0 NTU, mínimo de 27.0 NTU y promedio de 40.7 NTU; asimismo, la desviación estándar fue 5.6 NTU. En el punto de monitoreo H-2, efluente del humedal artificial con PVC, se alcanzaron valores máximo de 45.0 NTU, mínimo de 14.0 NTU y promedio de 23.4 NTU; asimismo, la desviación estándar fue 5.0 NTU. Por otro lado, para la eficiencia de la turbiedad, en el humedal artificial con GRAVA, efluente del punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores máximo de 62.5%, mínimo de 31.37% y promedio de 48.6%; además, la desviación estándar fue 7.6%. En el humedal artificial con PVC, efluente del punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 85.34%, mínimo de 48.64% y promedio de 70.2%; además, la desviación estándar fue 7.7%.

A continuación, se muestra el registro de la turbiedad, y los gráficos de la magnitud y la eficiencia de la turbiedad durante el periodo de operación.

	FECHA		HORA	TURBIEDAD (NTU)			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S01	Lu	26-ago	10:00	76.0	57.0	56.7	25.00%	25.39%
	Ma	27-ago	10:00	81.3	62.0	56.6	23.74%	30.38%
	Mi	28-ago	10:00	85.0	68.1	61.6	19.88%	27.53%
	Ju	29-ago	10:00	100.0	78.2	71.1	21.80%	28.90%
	Vi	30-ago	10:00	72.8	57.5	55.1	21.02%	24.31%
S02	Lu	02-sep	10:00	94.2	71.0	65.0	24.63%	31.00%
	Ma	03-sep	10:00	72.8	55.4	51.5	23.90%	29.26%
	Mi	04-sep	10:00	98.3	73.1	65.3	25.64%	33.57%
	Ju	05-sep	10:00	80.5	58.0	51.9	27.95%	35.53%
	Vi	06-sep	10:00	84.2	61.9	56.8	26.48%	32.54%
S03	Lu	09-sep	10:00	81.8	61.2	51.0	25.18%	37.65%
	Ma	10-sep	10:00	75.9	51.4	44.3	32.28%	41.63%
	Mi	11-sep	10:00	94.5	74.6	61.0	21.06%	35.45%
	Ju	12-sep	10:00	61.7	45.6	34.0	26.09%	44.89%
	Vi	13-sep	10:00	62.9	44.0	37.0	30.05%	41.18%
S04	Lu	16-sep	10:00	70.1	44.0	36.0	37.23%	48.64%
	Ma	17-sep	10:00	91.8	63.0	45.0	31.37%	50.98%
	Mi	18-sep	10:00	86.0	56.0	38.0	34.88%	55.81%
	Ju	19-sep	10:00	72.2	41.0	29.0	43.21%	59.83%
	Vi	20-sep	10:00	71.0	39.5	25.0	44.37%	64.79%
S05	Lu	23-sep	10:00	52.6	33.6	20.0	36.12%	61.98%
	Ma	24-sep	10:00	73.4	48.0	31.0	34.60%	57.77%
	Mi	25-sep	10:00	65.0	44.7	34.0	31.23%	47.69%
	Ju	26-sep	10:00	67.2	41.1	27.0	38.84%	59.82%
	Vi	27-sep	10:00	59.7	35.0	21.0	41.37%	64.82%
S06	Lu	30-sep	10:00	69.1	41.2	25.0	40.38%	63.82%
	Ma	01-oct	10:00	54.2	36.8	26.0	32.10%	52.03%
	Mi	02-oct	10:00	62.0	38.6	24.5	37.74%	60.48%
	Ju	03-oct	10:00	75.0	45.0	29.0	40.00%	61.33%
	Vi	04-oct	10:00	71.3	43.9	26.0	38.43%	63.53%

Cuadro IV-01

Registro de la turbiedad de la semana 01 a la semana 06.

Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	TURBIEDAD (NTU)			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S07	Lu	07-oct	10:00	58.9	37.0	25.0	37.18%	57.56%
	Ma	08-oct	10:00	69.4	37.0	21.0	46.69%	69.74%
	Mi	09-oct	10:00	61.9	40.0	27.0	35.38%	56.38%
	Ju	10-oct	10:00	60.9	37.0	20.6	39.24%	66.17%
	Vi	11-oct	10:00	71.8	43.0	28.0	40.11%	61.00%
S08	Lu	14-oct	10:00	78.3	42.0	26.0	46.36%	66.79%
	Ma	15-oct	10:00	76.0	40.0	25.0	47.37%	67.11%
	Mi	16-oct	10:00	80.1	42.0	28.0	47.57%	65.04%
	Ju	17-oct	10:00	78.0	46.0	25.0	41.03%	67.95%
	Vi	18-oct	10:00	71.0	38.0	21.0	46.48%	70.42%
S09	Lu	21-oct	10:00	81.0	41.0	27.0	49.38%	66.67%
	Ma	22-oct	10:00	81.0	42.0	25.0	48.15%	69.14%
	Mi	23-oct	10:00	78.0	47.0	31.0	39.74%	60.26%
	Ju	24-oct	10:00	101.7	55.0	28.5	45.92%	71.98%
	Vi	25-oct	10:00	98.0	45.0	22.0	54.08%	77.55%
S10	Lu	28-oct	10:00	88.8	37.6	22.0	57.66%	75.23%
	Ma	29-oct	10:00	89.4	53.2	32.1	40.49%	64.09%
	Mi	30-oct	10:00	90.4	38.7	19.5	57.19%	78.43%
	Ju	31-oct	10:00	62.9	39.7	22.5	36.88%	64.23%
	Vi	01-nov	10:00	75.9	37.6	17.5	50.46%	76.94%
S11	Lu	04-nov	10:00	78.0	42.0	23.1	46.15%	70.38%
	Ma	05-nov	10:00	80.1	40.2	22.5	49.81%	71.91%
	Mi	06-nov	10:00	85.0	43.0	24.0	49.41%	71.76%
	Ju	07-nov	10:00	80.1	40.2	22.5	49.81%	71.91%
	Vi	08-nov	10:00	71.9	45.2	28.1	37.13%	60.92%
S12	Lu	11-nov	10:00	102.0	42.6	23.5	58.24%	76.96%
	Ma	12-nov	10:00	77.9	42.0	20.0	46.08%	74.33%
	Mi	13-nov	10:00	62.5	31.2	21.2	50.08%	66.08%
	Ju	14-nov	10:00	63.0	30.0	17.0	52.38%	73.02%
	Vi	15-nov	10:00	62.5	41.0	26.0	34.40%	58.40%
S13	Lu	18-nov	10:00	95.4	43.2	25.3	54.72%	73.48%
	Ma	19-nov	10:00	84.5	48.1	29.9	43.08%	64.62%
	Mi	20-nov	10:00	78.0	38.0	21.8	51.28%	72.05%
	Ju	21-nov	10:00	84.5	48.1	29.9	43.08%	64.62%
	Vi	22-nov	10:00	78.0	42.0	21.8	46.15%	72.05%

Cuadro IV-02
Registro de la turbiedad de la semana 07 a la semana 13.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	TURBIEDAD (NTU)			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S14	Lu	25-nov	10:00	85.9	44.4	24.0	48.31%	72.06%
	Ma	26-nov	10:00	66.5	41.5	23.0	37.59%	65.41%
	Mi	27-nov	10:00	87.9	46.4	28.0	47.21%	68.15%
	Ju	28-nov	10:00	64.5	39.5	23.0	38.76%	64.34%
	Vi	29-nov	10:00	87.9	46.4	27.0	47.21%	69.28%
S15	Lu	02-dic	10:00	69.0	35.4	16.0	48.70%	76.81%
	Ma	03-dic	10:00	72.0	38.0	22.6	47.22%	68.61%
	Mi	04-dic	10:00	81.8	45.9	30.9	43.89%	62.22%
	Ju	05-dic	10:00	81.8	45.9	30.9	43.89%	62.22%
	Vi	06-dic	10:00	92.0	41.0	21.2	55.43%	76.96%
S16	Lu	09-dic	10:00	78.0	35.0	19.2	55.13%	75.38%
	Ma	10-dic	10:00	70.0	36.0	19.3	48.57%	72.43%
	Mi	11-dic	10:00	68.0	27.0	14.0	60.29%	79.41%
	Ju	12-dic	10:00	85.9	42.0	21.0	51.11%	75.55%
	Vi	13-dic	10:00	78.4	39.0	17.0	50.26%	78.32%
S17	Lu	16-dic	10:00	86.0	44.0	24.0	48.84%	72.09%
	Ma	17-dic	10:00	87.0	44.0	22.0	49.43%	74.71%
	Mi	18-dic	10:00	89.0	39.0	22.0	56.18%	75.28%
	Ju	19-dic	10:00	88.0	45.0	23.0	48.86%	73.86%
	Vi	20-dic	10:00	62.0	33.0	21.2	46.77%	65.81%
S18	Lu	23-dic	10:00	62.5	35.0	19.7	44.00%	68.48%
	Ju	26-dic	10:00	87.0	35.0	14.0	59.77%	83.91%
	Vi	27-dic	10:00	77.0	43.0	25.9	44.16%	66.36%
S19	Lu	30-dic	10:00	94.0	48.0	24.0	48.94%	74.47%
	Ju	02-ene	10:00	99.0	44.0	21.0	55.56%	78.79%
	Vi	03-ene	10:00	102.0	42.0	19.0	58.82%	81.37%
S20	Lu	06-ene	10:00	99.1	42.6	26.7	57.01%	73.06%
	Ma	07-ene	10:00	80.0	44.4	30.5	44.50%	61.88%
	Mi	08-ene	10:00	100.0	41.1	17.0	58.90%	83.00%
	Ju	09-ene	10:00	74.9	32.5	15.5	56.61%	79.31%
	Vi	10-ene	10:00	69.9	33.7	21.0	51.79%	69.96%
S21	Lu	13-ene	10:00	89.9	38.7	21.4	56.95%	76.20%
	Ma	14-ene	10:00	68.6	38.6	25.4	43.73%	62.97%
	Mi	15-ene	10:00	103.0	55.5	25.7	46.12%	75.05%
	Ju	16-ene	10:00	75.7	44.8	29.4	40.82%	61.16%
	Vi	17-ene	10:00	83.9	39.8	22.6	52.56%	73.06%

Cuadro IV-03
Registro de la turbiedad de la semana 14 a la semana 21.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	TURBIEDAD (NTU)			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S22	Lu	20-ene	10:00	78.0	38.0	22.0	51.28%	71.79%
	Ma	21-ene	10:00	83.9	39.8	22.6	52.56%	73.06%
	Mi	22-ene	10:00	77.1	36.2	17.0	53.05%	77.95%
	Ju	23-ene	10:00	75.7	44.8	29.4	40.82%	61.16%
	Vi	24-ene	10:00	89.2	42.1	27.5	52.80%	69.17%
S23	Lu	27-ene	10:00	90.4	39.2	19.0	56.64%	78.98%
	Ma	28-ene	10:00	89.2	42.1	28.4	52.80%	68.16%
	Mi	29-ene	10:00	80.3	34.9	20.4	56.54%	74.60%
	Ju	30-ene	10:00	88.3	38.4	18.0	56.51%	79.61%
	Vi	31-ene	10:00	74.8	33.4	22.0	55.35%	70.59%
S24	Lu	03-feb	10:00	72.7	32.5	16.4	55.30%	77.44%
	Ma	04-feb	10:00	74.8	33.4	21.1	55.35%	71.79%
	Mi	05-feb	10:00	73.7	32.7	17.9	55.63%	75.71%
	Ju	06-feb	10:00	75.7	44.8	29.4	40.82%	61.16%
	Vi	07-feb	10:00	78.6	33.6	19.0	57.25%	75.83%
S25	Lu	10-feb	10:00	89.2	48.5	23.9	45.63%	73.21%
	Ma	11-feb	10:00	78.6	33.6	19.0	57.25%	75.83%
	Mi	12-feb	10:00	80.3	42.0	23.2	47.70%	71.11%
	Ju	13-feb	10:00	67.6	33.2	21.6	50.89%	68.05%
	Vi	14-feb	10:00	70.2	29.8	14.0	57.55%	80.06%
S26	Lu	17-feb	10:00	93.4	38.4	21.0	58.89%	77.52%
	Ma	18-feb	10:00	89.2	44.0	23.9	50.67%	73.21%
	Mi	19-feb	10:00	81.0	36.8	23.9	54.57%	70.49%
	Ju	20-feb	10:00	80.3	42.0	23.2	47.70%	71.11%
	Vi	21-feb	10:00	88.7	35.9	13.0	59.53%	85.34%
S27	Lu	24-feb	10:00	102.1	45.6	21.0	55.34%	79.43%
	Ma	25-feb	10:00	93.4	38.4	21.0	58.89%	77.52%
	Mi	26-feb	10:00	91.6	38.2	17.0	58.30%	81.44%
	Ju	27-feb	10:00	89.2	48.5	23.9	45.63%	73.21%
	Vi	28-feb	10:00	84.2	34.5	17.0	59.03%	79.81%
S28	Lu	03-mar	10:00	99.8	44.2	26.8	55.71%	73.15%
	Ma	04-mar	10:00	93.4	38.4	21.0	58.89%	77.52%
	Mi	05-mar	10:00	90.4	43.2	25.4	52.21%	71.90%
	Ju	06-mar	10:00	91.6	38.2	21.2	58.30%	76.86%
	Vi	07-mar	10:00	93.7	41.1	21.0	56.14%	77.59%

Cuadro IV-04
Registro de la turbiedad de la semana 22 a la semana 28.
 Adaptada de fuente propia (2014).

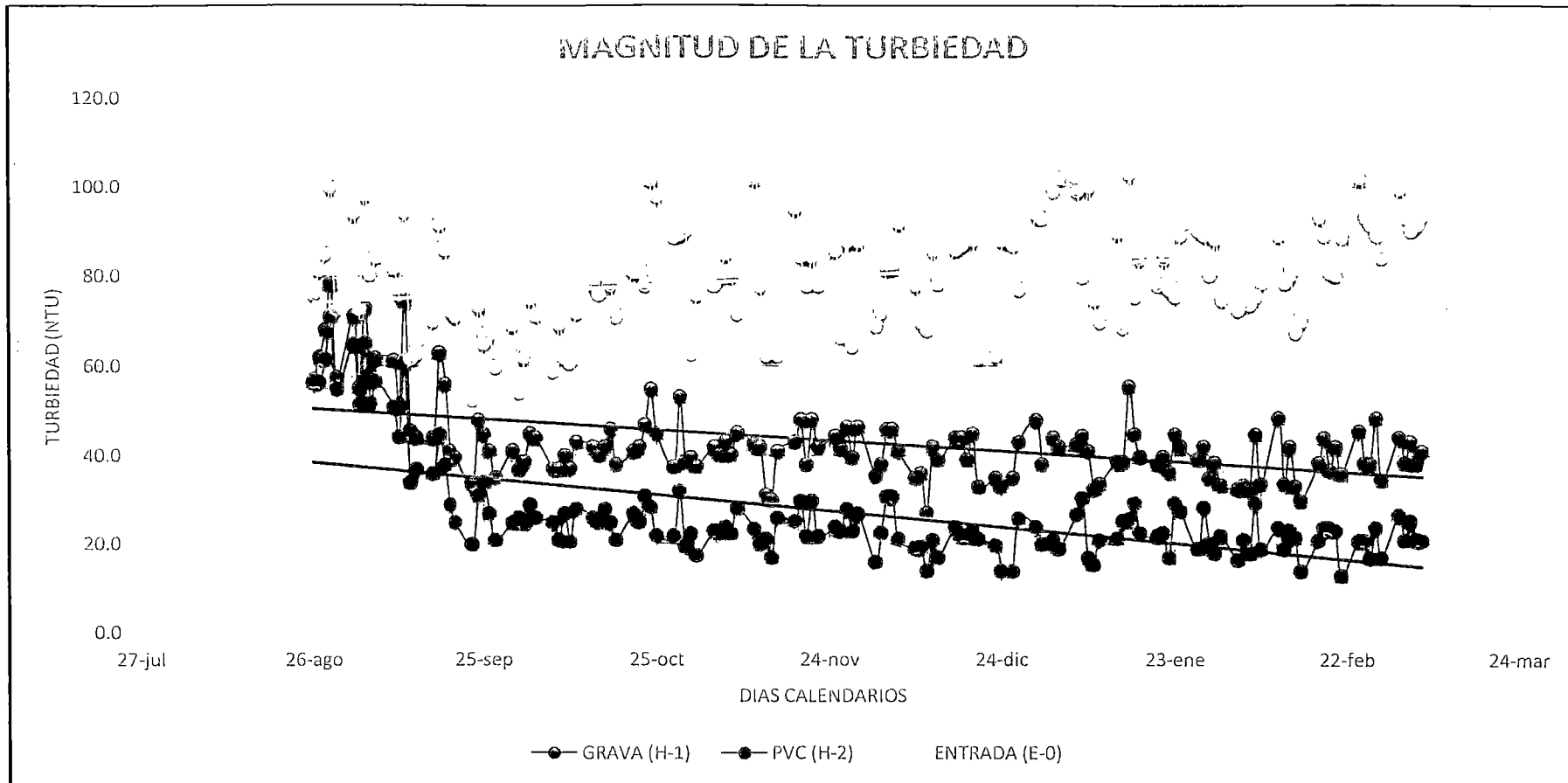


Gráfico IV-01

Registro de la turbiedad durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

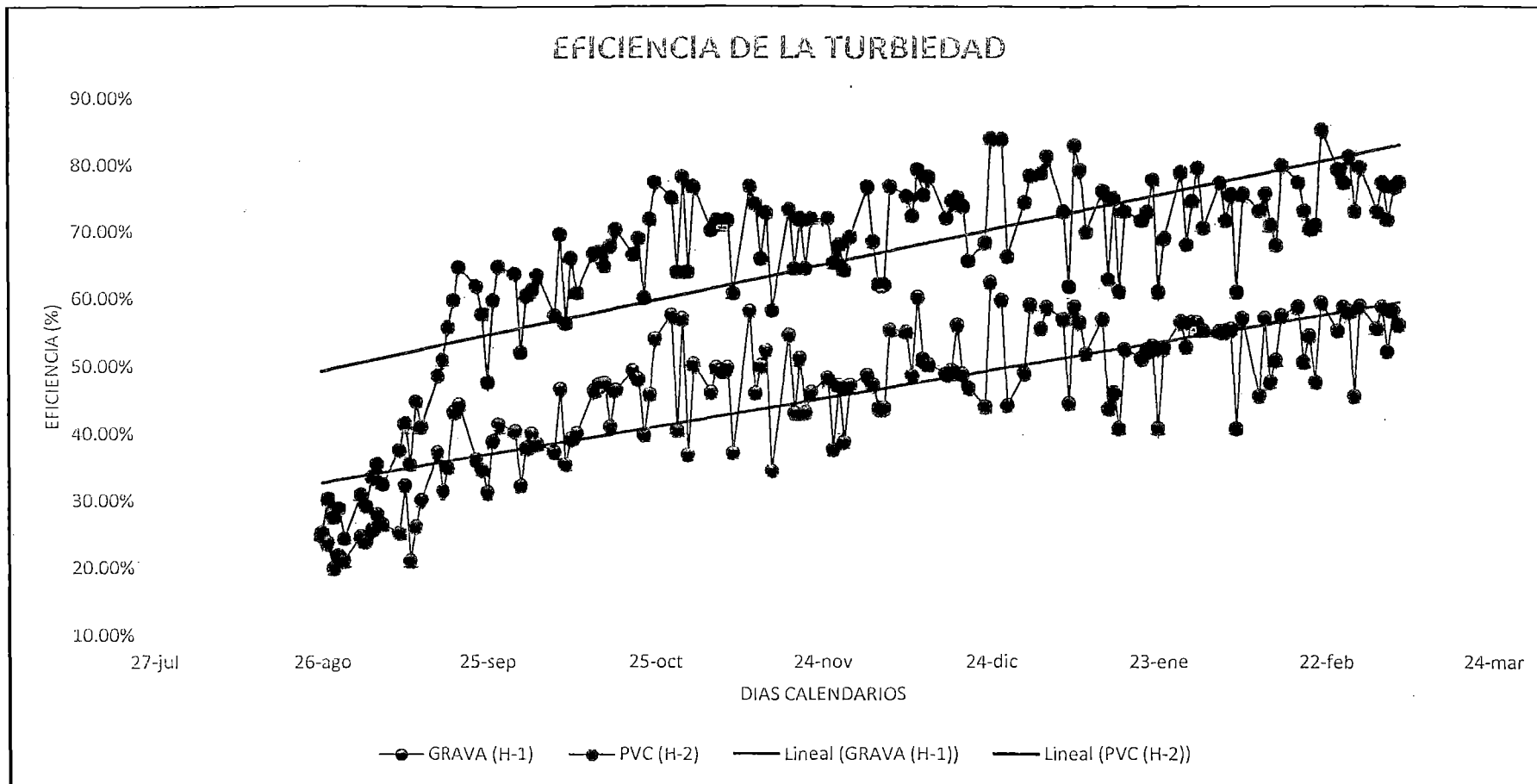


Gráfico IV-02

Remoción de la turbiedad durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

2. ANÁLISIS DE LA TURBIEDAD

En el periodo de letargo, para la magnitud y eficiencia de la turbiedad, respectivamente, se obtuvieron altos y bajos valores, debido a que el sistema de humedales iniciaba su proceso biológico. Al inicio, este fue inapreciable, porque, por un lado, las plantas acuáticas no tenían alta densidad de vegetación, dado que estas recién habían sido plantadas, por otro lado, el flujo lento del agua residual hizo que las partículas en suspensión se depositen en el fondo y, por último, la biopelícula no estaba en su máximo desarrollo, dado que esta recién estaba en formación.

Asimismo, en el periodo de letargo, a pesar de que las magnitudes de la turbiedad fueron similares en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos, dado que la superficie específica del material filtrante, en la que se adhirió la biopelícula, influyó a favor de la remoción de la turbiedad. En consecuencia, el humedal artificial con PVC alcanzó mayor eficiencia de la turbiedad que el humedal artificial con GRAVA, incrementando su valor de manera gradual en el tiempo.

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de la turbiedad, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo, debido a que el sistema de humedales logró una consistencia del proceso biológico. Por un lado, las plantas acuáticas alcanzaron una alta densidad de vegetación; por ello, a través de las raíces y rizomas que filtraron las partículas en suspensión, se logró una elevada remoción de la turbiedad. Por otro lado, el agua residual tuvo un el flujo lento; por ello, a través del mecanismo de sedimentación, se realizó la remoción de la turbiedad. Por último, la biopelícula alcanzó su máximo desarrollo; por ello, a través del mecanismo de absorción, se contribuyó a la remoción de la turbiedad.

Asimismo, en el periodo de evaluación, a pesar de que las magnitudes de la turbiedad presentaron un comportamiento semejante en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos de la operación, ya que la superficie específica del material filtrante, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron a favor de la remoción de la turbiedad. En consecuencia, el humedal artificial con PVC logró mayor eficiencia que el humedal artificial con GRAVA, incrementando gradualmente su valor en el tiempo; además, se observó que la diferencia de eficiencias de la turbiedad; entre ambos humedales, en promedio fue 21.6%; también, se percibió que el humedal artificial con PVC alcanzó la máxima eficiencia en la semana 26, mientras que el humedal artificial con GRAVA lo hizo en la semana 18; aparte de ello, se contempló que la eficiencia fue proporcional a la temperatura del agua residual.

Las desviaciones estándar, para la magnitud de la turbiedad, fueron 11.45 NTU, 5.6 NTU y 5.0 NTU, respectivamente, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que la turbiedad del punto de monitoreo E-0 presentó mayor dispersión, respecto a su promedio, que de los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Asimismo, la turbiedad de los puntos de monitoreo H-1 y H-2 fueron valores confiables, dado que estos presentaron menor desviación estándar, a pesar de que la turbiedad del punto de monitoreo E-0 tuvo alta dispersión. Para la eficiencia de la turbiedad, las desviaciones estándar fueron 7.7% y 7.6%, respectivamente, en los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Esto indica que la eficiencia de la turbiedad presentó similar rango de dispersión, en ambos humedales, respecto a sus valores promedio. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-1 fue, sutilmente, mayor que en el punto de monitoreo H-2. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la remoción de la turbiedad; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

B. REGISTRO DE LA TEMPERATURA

La temperatura influye sobre los parámetros relacionados a la remoción de la materia orgánica, en función al clima y a las estaciones del año.

1. RESULTADO DE LA TEMPERATURA

Según el registro de la temperatura, durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio de la temperatura en cada punto de monitoreo.

En el periodo de letargo, se obtuvieron bajos valores de la temperatura. En el afluente de los humedales artificiales, punto de monitoreo E-0, se alcanzaron valores comprendidos entre 16.7°C y 18.7°C con una tendencia, en aumento, de 0.67°C por semana. En los efluentes de los humedales artificiales, puntos de monitoreo H-1 y H-2, se alcanzaron valores comprendidos entre 16.5°C y 18.6°C con una tendencia, en aumento, de 0.70°C por semana.

En el periodo de evaluación, se obtuvieron valores de temperatura que se incrementaron en el tiempo. En el afluente de los humedales artificiales, punto de monitoreo E-0, se alcanzaron valores máximo de 30.8°C, mínimo de 16.7°C y promedio de 23.2°C; asimismo, la desviación estándar fue 4.0°C. En el efluente del humedal artificial con GRAVA, punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores máximo de 30.5°C, mínimo de 16.4°C y promedio de 22.8°C; asimismo, la desviación estándar fue 4.1°C. En el efluente del humedal artificial con PVC, punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 30.1°C, mínimo de 16.4°C y promedio de 22.6°C; la desviación estándar fue 4.0°C.

A continuación, se muestra el registro y gráfico de la temperatura.

	FECHA		HORA	TEMPERATURA (°C)		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S01	Lu	26-ago	10:00	16.8	16.5	17.4
	Ma	27-ago	10:00	17.6	16.7	17.2
	Mi	28-ago	10:00	17.1	16.6	17.1
	Ju	29-ago	10:00	17.7	17.0	17.5
	Vi	30-ago	10:00	17.8	17.4	17.7
S02	Lu	02-sep	10:00	18.0	17.6	17.8
	Ma	03-sep	10:00	18.1	17.4	17.6
	Mi	04-sep	10:00	16.9	16.5	16.8
	Ju	05-sep	10:00	17.7	17.5	17.8
	Vi	06-sep	10:00	18.7	18.4	18.6
S03	Lu	09-sep	10:00	18.1	18.0	18.0
	Ma	10-sep	10:00	17.9	17.7	17.8
	Mi	11-sep	10:00	18.2	17.9	18.1
	Ju	12-sep	10:00	18.3	18.1	18.2
	Vi	13-sep	10:00	17.9	17.5	17.8
S04	Lu	16-sep	10:00	17.5	17.6	17.9
	Ma	17-sep	10:00	18.0	17.4	17.5
	Mi	18-sep	10:00	17.1	16.5	16.7
	Ju	19-sep	10:00	18.2	16.9	17.1
	Vi	20-sep	10:00	19.3	18.8	19.0
S05	Lu	23-sep	10:00	17.1	16.6	16.6
	Ma	24-sep	10:00	17.0	16.7	16.4
	Mi	25-sep	10:00	17.1	16.4	16.5
	Ju	26-sep	10:00	16.9	16.6	16.6
	Vi	27-sep	10:00	16.7	16.5	16.8
S06	Lu	30-sep	10:00	18.9	18.8	18.6
	Ma	01-oct	10:00	17.9	17.6	17.4
	Mi	02-oct	10:00	18.0	17.4	17.4
	Ju	03-oct	10:00	17.7	16.9	17.2
	Vi	04-oct	10:00	17.5	17.1	17.0
S07	Lu	07-oct	10:00	18.7	18.1	18.3
	Ma	08-oct	10:00	17.7	17.1	17.3
	Mi	09-oct	10:00	19.7	19.1	19.3
	Ju	10-oct	10:00	18.7	18.1	18.3
	Vi	11-oct	10:00	19.1	18.6	18.7

Cuadro IV-05
Registro de la temperatura de la semana 01 a la semana 07.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	TEMPERATURA (°C)		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S08	Lu	14-oct	10:00	17.9	17.7	17.8
	Ma	15-oct	10:00	18.4	18.1	18.2
	Mi	16-oct	10:00	18.3	18.0	18.1
	Ju	17-oct	10:00	18.6	18.1	18.3
	Vi	18-oct	10:00	19.5	19.2	19.4
S09	Lu	21-oct	10:00	19.1	18.7	18.8
	Ma	22-oct	10:00	17.8	17.3	17.4
	Mi	23-oct	10:00	18.5	18.3	18.4
	Ju	24-oct	10:00	21.2	20.8	21.0
	Vi	25-oct	10:00	19.8	19.4	19.5
S10	Lu	28-oct	10:00	20.0	18.9	18.6
	Ma	29-oct	10:00	20.3	19.0	19.5
	Mi	30-oct	10:00	18.7	18.0	18.2
	Ju	31-oct	10:00	20.0	18.7	18.9
	Vi	01-nov	10:00	20.0	18.9	18.6
S11	Lu	04-nov	10:00	20.3	19.7	19.9
	Ma	05-nov	10:00	19.8	18.5	19.4
	Mi	06-nov	10:00	20.3	19.7	19.9
	Ju	07-nov	10:00	19.8	18.5	19.4
	Vi	08-nov	10:00	18.7	18.1	17.7
S12	Lu	11-nov	10:00	19.3	18.8	17.9
	Ma	12-nov	10:00	21.9	20.1	20.3
	Mi	13-nov	10:00	18.7	18.9	18.3
	Ju	14-nov	10:00	19.1	18.6	18.7
	Vi	15-nov	10:00	18.7	18.9	18.3
S13	Lu	18-nov	10:00	20.9	20.5	19.2
	Ma	19-nov	10:00	24.1	24.9	24.7
	Mi	20-nov	10:00	23.2	24.6	24.0
	Ju	21-nov	10:00	24.1	24.9	24.7
	Vi	22-nov	10:00	23.2	24.6	24.0
S14	Lu	25-nov	10:00	20.1	19.3	19.4
	Ma	26-nov	10:00	22.2	21.3	21.4
	Mi	27-nov	10:00	22.1	21.3	21.4
	Ju	28-nov	10:00	20.2	19.3	19.4
	Vi	29-nov	10:00	22.1	21.3	21.4

Cuadro IV-06
Registro de la temperatura de la semana 08 a la semana 14.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	TEMPERATURA (°C)		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S15	Lu	02-dic	10:00	25.8	25.1	24.6
	Ma	03-dic	10:00	25.8	25.1	24.6
	Mi	04-dic	10:00	24.4	23.0	23.0
	Ju	05-dic	10:00	24.4	23.0	23.0
	Vi	06-dic	10:00	21.9	21.1	20.0
S16	Lu	09-dic	10:00	22.0	21.8	21.7
	Ma	10-dic	10:00	22.4	21.7	21.6
	Mi	11-dic	10:00	22.6	22.1	22.0
	Ju	12-dic	10:00	22.5	21.8	21.7
	Vi	13-dic	10:00	21.6	21.5	21.3
S17	Lu	16-dic	10:00	21.4	21.3	21.0
	Ma	17-dic	10:00	25.4	25.3	25.1
	Mi	18-dic	10:00	22.4	22.3	22.0
	Ju	19-dic	10:00	23.1	23.0	22.9
	Vi	20-dic	10:00	23.2	22.1	22.9
S18	Lu	23-dic	10:00	23.4	23.3	23.0
	Ma	24-dic	10:00	---	---	---
	Mi	25-dic	10:00	---	---	---
	Ju	26-dic	10:00	25.1	24.8	24.6
	Vi	27-dic	10:00	25.2	25.0	24.9
S19	Lu	30-dic	10:00	25.3	25.3	23.0
	Ma	31-dic	10:00	---	---	---
	Mi	01-ene	10:00	---	---	---
	Ju	02-ene	10:00	26.2	26.1	26.0
	Vi	03-ene	10:00	26.6	26.5	26.0
S20	Lu	06-ene	10:00	26.8	26.7	26.1
	Ma	07-ene	10:00	25.0	24.7	23.9
	Mi	08-ene	10:00	26.1	25.1	24.6
	Ju	09-ene	10:00	25.8	25.8	25.4
	Vi	10-ene	10:00	26.1	26.1	25.7
S21	Lu	13-ene	10:00	25.8	25.7	25.4
	Ma	14-ene	10:00	24.8	24.7	24.2
	Mi	15-ene	10:00	23.9	23.8	23.3
	Ju	16-ene	10:00	25.4	25.4	25.2
	Vi	17-ene	10:00	28.1	27.6	28.1

Cuadro IV-07
Registro de la temperatura de la semana 15 a la semana 21.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	TEMPERATURA (°C)		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S22	Lu	20-ene	10:00	24.7	24.7	24.8
	Ma	21-ene	10:00	28.1	27.6	28.1
	Mi	22-ene	10:00	26.2	26.5	26.5
	Ju	23-ene	10:00	25.4	25.4	25.2
	Vi	24-ene	10:00	28.4	27.9	28.3
S23	Lu	27-ene	10:00	28.5	28.0	27.8
	Ma	28-ene	10:00	28.4	27.9	28.3
	Mi	29-ene	10:00	26.8	26.5	26.6
	Ju	30-ene	10:00	28.4	27.9	27.5
	Vi	31-ene	10:00	28.6	27.8	28.0
S24	Lu	03-feb	10:00	27.2	27.2	26.6
	Ma	04-feb	10:00	28.6	27.8	28.0
	Mi	05-feb	10:00	27.0	26.6	26.5
	Ju	06-feb	10:00	25.4	25.4	25.2
	Vi	07-feb	10:00	27.5	27.4	26.9
S25	Lu	10-feb	10:00	27.8	27.8	27.1
	Ma	11-feb	10:00	27.5	27.4	26.9
	Mi	12-feb	10:00	28.7	28.6	28.1
	Ju	13-feb	10:00	26.4	25.6	25.8
	Vi	14-feb	10:00	27.0	26.8	26.0
S26	Lu	17-feb	10:00	27.1	26.5	26.5
	Ma	18-feb	10:00	27.8	27.8	27.1
	Mi	19-feb	10:00	26.9	26.8	26.7
	Ju	20-feb	10:00	28.7	28.6	28.1
	Vi	21-feb	10:00	28.3	28.2	27.9
S27	Lu	24-feb	10:00	30.4	29.9	29.7
	Ma	25-feb	10:00	27.1	26.5	26.5
	Mi	26-feb	10:00	29.1	29.3	29.2
	Ju	27-feb	10:00	27.8	27.8	27.1
	Vi	28-feb	10:00	28.4	27.8	27.9
S28	Lu	03-mar	10:00	30.8	30.5	30.1
	Ma	04-mar	10:00	27.1	26.5	26.5
	Mi	05-mar	10:00	29.4	29.4	29.1
	Ju	06-mar	10:00	29.1	29.3	29.2
	Vi	07-mar	10:00	29.3	29.2	27.9

Cuadro IV-08
Registro de la temperatura de la semana 22 a la semana 28.
 Adaptada de fuente propia (2014).

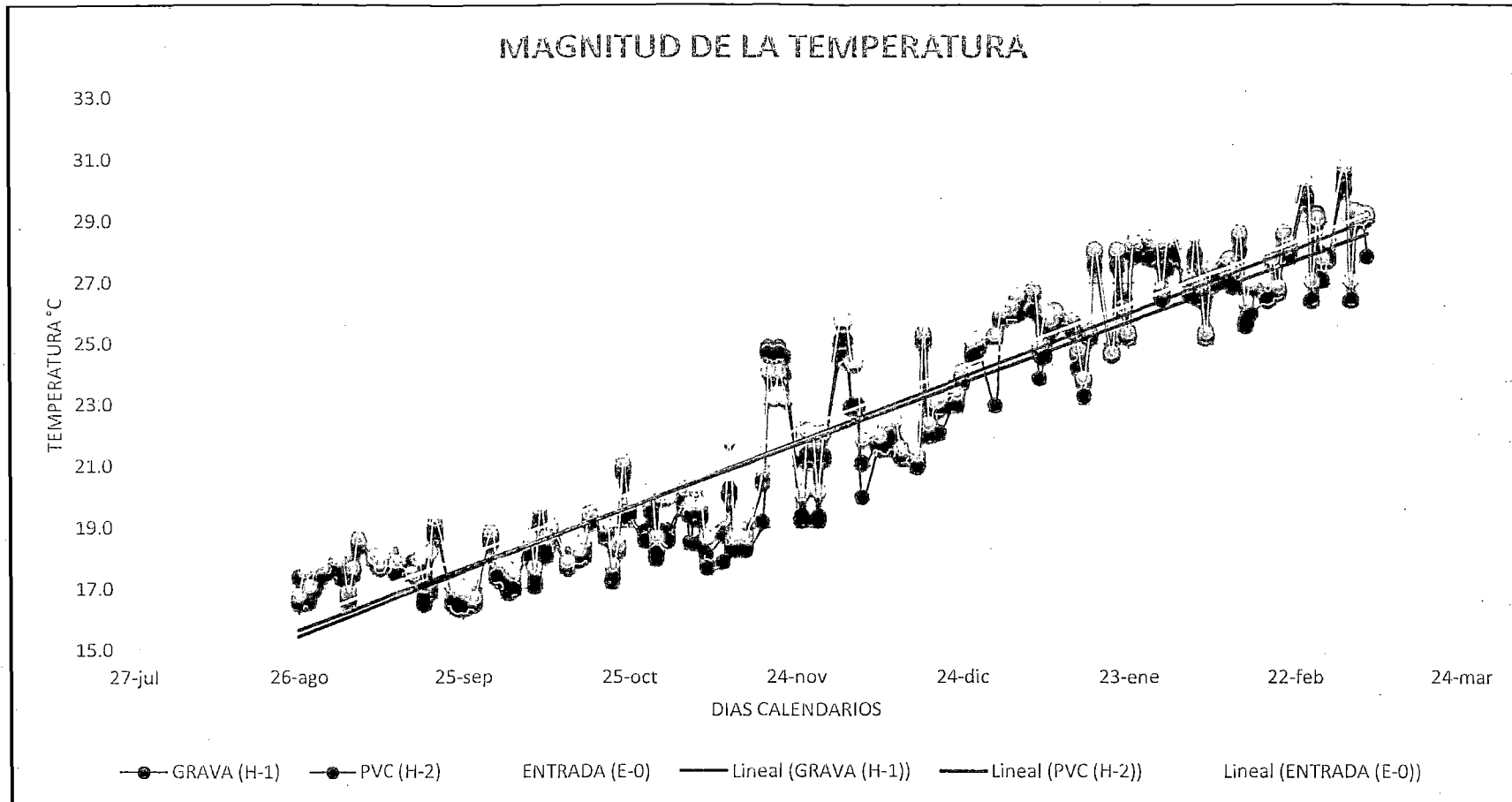


Gráfico IV-03

Registro de la temperatura durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

2. ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA

En el periodo de letargo, se obtuvieron bajos valores de la temperatura, debido a que el sistema de humedales, en las primeras semanas, se desarrolló durante la estación de invierno, en el cual las condiciones climatológicas tuvieron, como característica principal, bajas temperaturas.

Asimismo, en el periodo de letargo, por un lado, la temperatura del afluente, punto de monitoreo E-0, fue mayor que la temperatura de los efluentes, puntos de monitoreo H-1 y H-2, debido a que el afluente provino del tanque de almacenamiento, el cual tuvo alta capacidad térmica; por otro lado, a pesar de que las temperaturas fueron similares en ambos humedales, el humedal artificial con GRAVA obtuvo los valores más bajos, dado que la grava, al tener menor calor específico, se enfrió con mayor facilidad en temperaturas bajas. En consecuencia, el humedal artificial con PVC alcanzó mayor temperatura que el humedal artificial con GRAVA, incrementando, gradualmente, su valor en el tiempo.

En el periodo de evaluación, se obtuvieron valores de temperatura que se incrementaron en el tiempo, debido a que el sistema de humedales, en ese periodo, se desarrolló durante las estaciones primavera y verano, en las cuales, por un lado, las temperaturas tendieron a incrementarse significativamente y, por otro lado, las condiciones climatológicas tuvieron, como característica principal, elevadas temperaturas.

Asimismo, en el periodo de evaluación, por un lado, la temperatura del afluente, punto de monitoreo E-0, fue mayor que la temperatura de los efluentes, puntos de monitoreo H-1 y H-2, debido a que el afluente provino del tanque de almacenamiento, el cual tuvo alta

capacidad térmica; por otro lado, a pesar de que las temperaturas fueron similares en ambos humedales, a partir de la semana 10, el humedal artificial con GRAVA obtuvo los valores más altos, dado que la grava, al tener menor calor específico, se calentó con mayor facilidad en temperaturas altas. En consecuencia, el humedal artificial con PVC alcanzó menor temperatura que el humedal artificial con GRAVA, incrementando su valor en el tiempo; además, se contempló que la temperatura fue proporcional a las eficiencias de los parámetros relacionados a la remoción de la materia orgánica, dado que elevadas temperaturas aumentaron la energía interna de los microorganismos que realizaron la degradación de la materia orgánica.

Las desviaciones estándar de la temperatura fueron 4.0 °C, 4.1 °C y 4.0 °C, respectivamente, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que la temperatura de los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2 presentaron similar dispersión respecto a sus valores promedio. Asimismo, la temperatura de los puntos de monitoreo fueron valores confiables, dado que estos presentaron baja desviación estándar. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-2 fue, sutilmente, menor que en el punto de monitoreo H-1. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la capacidad térmica; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

C. REGISTRO DEL pH

El pH es el parámetro que mide en el agua residual, la concentración de iones H^+ . Un pH alto indica una baja concentración de iones H^+ (medio alcalino) y un pH bajo indica una alta concentración de iones H^+ (medio ácido).

1. RESULTADO DEL pH

Según el registro del pH, durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio del pH en cada punto de monitoreo.

En el periodo de letargo, se obtuvieron valores de pH con tendencia, en aumento, cuasi constante. En el afluente de los humedales artificiales, punto de monitoreo E-0, se alcanzaron valores comprendidos entre 6.99 y 7.23. En los efluentes de los humedales artificiales, puntos de monitoreo H-1 y H-2, se alcanzaron valores comprendidos entre 6.91 y 7.42.

En el periodo de evaluación, se obtuvieron valores de pH que se incrementaron gradualmente en el tiempo. En el afluente de los humedales artificiales, punto de monitoreo E-0, se alcanzaron valores máximo de 7.24, mínimo de 6.32 y promedio de 7.03; asimismo, la desviación estándar fue 0.1. En el efluente del humedal artificial con GRAVA, punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores máximo de 7.41, mínimo de 6.48 y promedio de 7.19; asimismo, la desviación estándar fue 0.2. En el efluente del humedal artificial con PVC, punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 7.42, mínimo de 6.46 y promedio de 7.18; asimismo, la desviación estándar fue 0.1.

A continuación, se muestra el registro y el gráfico del pH.

	FECHA		HORA	pH		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S01	Lu	26-ago	10:00	7.13	7.24	7.02
	Ma	27-ago	10:00	6.99	7.14	7.02
	Mi	28-ago	10:00	7.03	7.14	6.92
	Ju	29-ago	10:00	7.03	7.05	6.97
	Vi	30-ago	10:00	7.01	7.08	7.02
S02	Lu	02-sep	10:00	7.02	6.91	6.79
	Ma	03-sep	10:00	7.05	7.09	7.01
	Mi	04-sep	10:00	7.02	7.01	6.82
	Ju	05-sep	10:00	7.07	7.27	7.15
	Vi	06-sep	10:00	7.17	7.10	7.02
S03	Lu	09-sep	10:00	7.05	7.37	7.41
	Ma	10-sep	10:00	7.13	7.31	7.42
	Mi	11-sep	10:00	7.09	7.37	7.38
	Ju	12-sep	10:00	7.23	7.41	7.22
	Vi	13-sep	10:00	7.09	7.37	7.28
S04	Lu	16-sep	10:00	6.76	7.22	7.08
	Ma	17-sep	10:00	7.07	7.32	7.25
	Mi	18-sep	10:00	7.01	7.25	7.20
	Ju	19-sep	10:00	7.15	7.40	7.43
	Vi	20-sep	10:00	7.17	7.42	7.35
S05	Lu	23-sep	10:00	7.03	7.05	7.13
	Ma	24-sep	10:00	7.01	6.99	7.02
	Mi	25-sep	10:00	6.91	7.11	7.09
	Ju	26-sep	10:00	6.88	7.02	7.07
	Vi	27-sep	10:00	6.91	7.11	7.09
S06	Lu	30-sep	10:00	7.13	7.24	7.02
	Ma	01-oct	10:00	6.99	7.00	7.02
	Mi	02-oct	10:00	7.03	7.14	6.92
	Ju	03-oct	10:00	7.03	7.05	7.13
	Vi	04-oct	10:00	7.01	6.99	7.02
S07	Lu	07-oct	10:00	7.00	6.72	7.10
	Ma	08-oct	10:00	6.93	7.15	6.84
	Mi	09-oct	10:00	7.04	7.24	7.26
	Ju	10-oct	10:00	7.05	7.37	7.41
	Vi	11-oct	10:00	7.05	7.11	7.13

Cuadro IV-09
Registro del pH de la semana 01 a la semana 07.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	pH		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S08	Lu	14-oct	10:00	7.14	7.10	7.15
	Ma	15-oct	10:00	6.91	6.88	7.12
	Mi	16-oct	10:00	7.05	6.99	7.01
	Ju	17-oct	10:00	6.91	6.88	7.12
	Vi	18-oct	10:00	7.05	6.99	7.01
S09	Lu	21-oct	10:00	6.78	6.76	6.77
	Ma	22-oct	10:00	7.02	7.04	7.14
	Mi	23-oct	10:00	6.71	6.91	6.89
	Ju	24-oct	10:00	7.07	7.00	7.28
	Vi	25-oct	10:00	7.17	7.07	7.18
S10	Lu	28-oct	10:00	7.22	7.31	7.29
	Ma	29-oct	10:00	6.90	7.10	6.95
	Mi	30-oct	10:00	7.09	7.43	7.37
	Ju	31-oct	10:00	6.87	7.20	7.28
	Vi	01-nov	10:00	7.09	7.43	7.37
S11	Lu	04-nov	10:00	7.12	7.24	7.24
	Ma	05-nov	10:00	7.08	7.11	7.10
	Mi	06-nov	10:00	7.12	7.24	7.24
	Ju	07-nov	10:00	7.08	7.11	7.10
	Vi	08-nov	10:00	7.02	7.28	7.21
S12	Lu	11-nov	10:00	6.86	7.21	7.26
	Ma	12-nov	10:00	7.09	7.29	7.25
	Mi	13-nov	10:00	6.96	7.21	7.26
	Ju	14-nov	10:00	6.97	6.91	6.98
	Vi	15-nov	10:00	6.99	7.00	7.02
S13	Lu	18-nov	10:00	7.13	7.24	7.02
	Ma	19-nov	10:00	6.99	7.00	7.02
	Mi	20-nov	10:00	7.03	7.14	6.92
	Ju	21-nov	10:00	7.03	7.05	7.13
	Vi	22-nov	10:00	7.01	6.99	7.02
S14	Lu	25-nov	10:00	7.03	7.05	7.13
	Ma	26-nov	10:00	7.01	6.99	7.02
	Mi	27-nov	10:00	6.91	7.11	7.09
	Ju	28-nov	10:00	6.88	7.02	7.07
	Vi	29-nov	10:00	6.91	7.11	7.09

Cuadro IV-10
Registro del pH de la semana 08 a la semana 14.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	pH		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S15	Lu	02-dic	10:00	7.01	7.34	7.06
	Ma	03-dic	10:00	6.91	7.11	7.09
	Mi	04-dic	10:00	7.19	7.37	7.41
	Ju	05-dic	10:00	7.01	7.33	7.27
	Vi	06-dic	10:00	6.91	7.23	7.15
S16	Lu	09-dic	10:00	7.01	7.33	7.27
	Ma	10-dic	10:00	6.88	7.11	7.12
	Mi	11-dic	10:00	6.92	7.14	7.17
	Ju	12-dic	10:00	7.10	6.82	7.20
	Vi	13-dic	10:00	6.93	7.15	6.84
S17	Lu	16-dic	10:00	7.00	6.72	7.10
	Ma	17-dic	10:00	6.93	7.15	6.84
	Mi	18-dic	10:00	7.04	7.24	7.26
	Ju	19-dic	10:00	7.05	7.37	7.41
	Vi	20-dic	10:00	7.05	7.11	7.13
S18	Lu	23-dic	10:00	7.05	7.37	7.41
	Ma	24-dic	10:00	---	---	---
	Mi	25-dic	10:00	---	---	---
	Ju	26-dic	10:00	7.23	7.41	7.52
	Vi	27-dic	10:00	7.09	7.37	7.38
S19	Lu	30-dic	10:00	7.13	7.42	7.31
	Ma	31-dic	10:00	---	---	---
	Mi	01-ene	10:00	---	---	---
	Ju	02-ene	10:00	7.11	7.32	7.19
	Vi	03-ene	10:00	7.01	7.22	7.09
S20	Lu	06-ene	10:00	7.11	7.30	7.29
	Ma	07-ene	10:00	6.60	7.15	6.86
	Mi	08-ene	10:00	6.85	7.11	7.19
	Ju	09-ene	10:00	7.24	7.34	7.30
	Vi	10-ene	10:00	6.95	6.96	7.14
S21	Lu	13-ene	10:00	7.02	7.17	7.19
	Ma	14-ene	10:00	6.73	7.12	7.09
	Mi	15-ene	10:00	7.02	7.41	7.17
	Ju	16-ene	10:00	7.02	7.26	7.26
	Vi	17-ene	10:00	6.99	7.05	7.38

Cuadro IV-11
Registro del pH de la semana 15 a la semana 21.
 Adaptada de fuente propia (2014).

	FECHA		HORA	pH		
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)
S22	Lu	20-ene	10:00	6.76	7.22	7.08
	Ma	21-ene	10:00	7.07	7.32	7.25
	Mi	22-ene	10:00	7.01	7.25	7.20
	Ju	23-ene	10:00	7.15	7.40	7.43
	Vi	24-ene	10:00	7.17	7.42	7.35
S23	Lu	27-ene	10:00	7.05	7.30	7.33
	Ma	28-ene	10:00	7.14	7.31	7.32
	Mi	29-ene	10:00	7.04	7.28	7.32
	Ju	30-ene	10:00	6.88	7.31	7.25
	Vi	31-ene	10:00	6.97	7.22	7.15
S24	Lu	03-feb	10:00	7.07	7.39	7.05
	Ma	04-feb	10:00	7.04	7.28	7.24
	Mi	05-feb	10:00	6.94	7.18	7.14
	Ju	06-feb	10:00	7.10	7.16	7.13
	Vi	07-feb	10:00	7.00	7.06	7.03
S25	Lu	10-feb	10:00	7.14	7.34	7.28
	Ma	11-feb	10:00	7.04	7.24	7.18
	Mi	12-feb	10:00	7.03	7.29	7.27
	Ju	13-feb	10:00	7.12	7.29	7.27
	Vi	14-feb	10:00	7.18	6.96	7.23
S26	Lu	17-feb	10:00	7.28	7.34	7.31
	Ma	18-feb	10:00	7.14	7.34	7.28
	Mi	19-feb	10:00	7.12	7.17	7.15
	Ju	20-feb	10:00	7.03	7.29	7.27
	Vi	21-feb	10:00	7.19	7.23	7.20
S27	Lu	24-feb	10:00	7.11	7.34	7.28
	Ma	25-feb	10:00	7.28	7.34	7.31
	Mi	26-feb	10:00	7.10	7.18	7.14
	Ju	27-feb	10:00	7.14	7.28	7.34
	Vi	28-feb	10:00	7.31	7.36	7.33
S28	Lu	03-mar	10:00	7.14	7.24	7.19
	Ma	04-mar	10:00	7.28	7.34	7.28
	Mi	05-mar	10:00	7.21	7.24	7.22
	Ju	06-mar	10:00	7.10	7.18	7.14
	Vi	07-mar	10:00	7.22	7.30	7.26

Cuadro IV-12
Registro del pH de la semana 22 a la semana 28.
 Adaptada de fuente propia (2014).

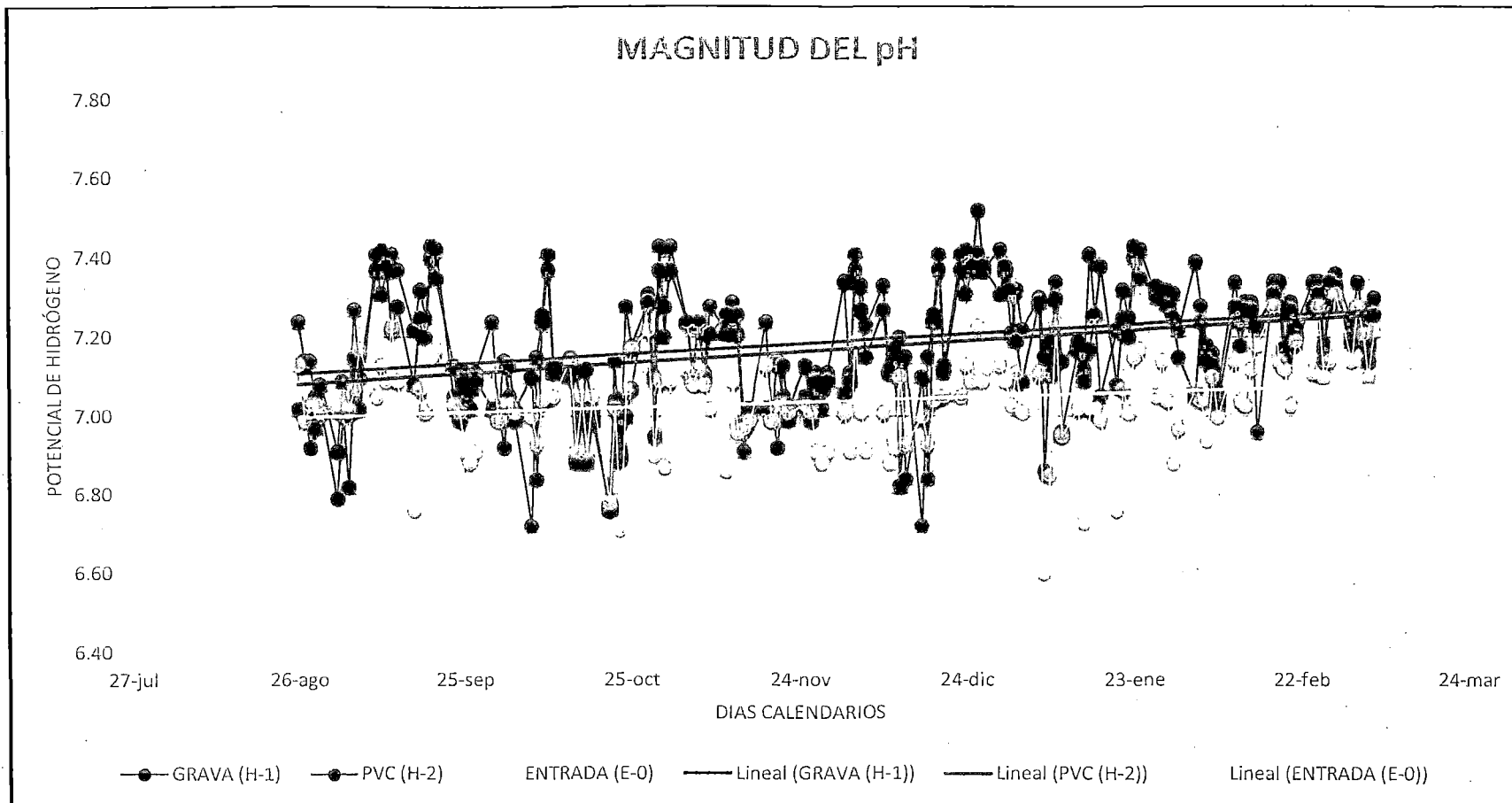


Gráfico IV-04
Registro del pH durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

2. ANÁLISIS DEL pH

En el periodo de letargo, se obtuvieron valores de pH con tendencia, en aumento, cuasi constante, debido a que, en las primeras semanas, se formó la biopelícula. Es decir, los microorganismos, al formar la biopelícula, como parte del proceso biológico, aumentaron, sutilmente, el valor del pH para alcanzar su máximo desarrollo.

Asimismo, en el periodo de letargo, por un lado, el valor del pH de los efluentes, puntos de monitoreo H-1 y H-2, fue mayor que el valor del pH del afluente, punto de monitoreo E-0, debido a que el pH de los efluentes fue reflejo de la actividad microbiana que, degradando la materia orgánica, generó compuestos orgánicos simples con bajas concentraciones de iones H^+ , lo que incrementó el valor del pH; por otro lado, a pesar de que los valores del pH fueron similares en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos, dado que el intercambio iónico, entre las moléculas del material filtrante PVC y el agua residual, generó compuestos con iones de H^+ que disminuyeron el valor del pH. En consecuencia, el humedal artificial con GRAVA alcanzó mayor pH que el humedal artificial con PVC.

En el periodo de evaluación, se obtuvieron valores de pH que se incrementaron gradualmente en el tiempo, debido a que los microorganismos, elevando el valor del pH en el rango de 6 a 7.5, como parte del proceso biológico, alcanzaron su máximo desarrollo. Es decir, los microorganismos, al degradar más materia orgánica, como parte la actividad microbiana, generaron mayor cantidad de compuestos orgánicos simples con baja concentración de iones H^+ , que aumentaron el valor del pH.

Asimismo, en el periodo de evaluación, por un lado, el valor del pH de los efluentes, puntos de monitoreo H-1 y H-2, fue mayor que el valor del pH del afluente, punto de monitoreo E-0, debido a que el pH de los efluentes fue reflejo de la actividad microbiana que, degradando la materia orgánica, generó compuestos orgánicos simples con bajas concentraciones de iones H^+ , lo que incrementó el valor del pH; por otro lado, a pesar de que los valores del pH fueron similares en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos, dado que el intercambio iónico, entre las moléculas del material filtrante del PVC y el agua residual, generó compuestos con iones de H^+ , lo que disminuyó su valor de pH. Sin embargo, la gradiente de pH en el humedal artificial con PVC fue mayor que la gradiente de pH en el humedal artificial con GRAVA, debido a la mayor concentración de microorganismos, adheridos a la extensa superficie del PVC corrugado, que degradaron la materia orgánica, como parte de la actividad microbiana. En consecuencia, cada vez con menor margen, el humedal artificial con GRAVA alcanzó mayor pH que el humedal artificial con PVC.

Las desviaciones estándar de los valores de pH 0.1, 0.2 y 0.1, respectivamente, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que el pH de los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2 presentaron similar dispersión respecto a sus valores promedio. Asimismo, el pH de los puntos de monitoreo fueron valores confiables, dado que estos presentaron baja desviación estándar. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-2 fue, sutilmente, menor que en el punto de monitoreo H-1. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la capacidad buffer para regular el pH; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

D. REGISTRO DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS

Los sólidos suspendidos es el parámetro que, en el agua residual, se relaciona con la presencia de materia orgánica. Asimismo, los sólidos suspendidos indican la cantidad de materia en suspensión que pueden ser separados mediante operaciones mecánicas. El impacto que provoca la presencia de sólidos suspendidos es la formación de un área expuesta a la adsorción de agentes químicos, biológicos y materia orgánica que al degradarse deteriora la calidad del agua. Entonces, los sólidos en suspensión son mayor cuanto mayor es la contaminación del agua residual. Por consiguiente, se considera un indicador de interés en el tratamiento de aguas residuales.

Los sólidos suspendidos se dividen en sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos fijos (SSF) y sólidos suspendidos volátiles (SSV). Por un lado, los SST indican la cantidad de sólidos en suspensión, presentes, en el agua residual, que pueden ser separados mediante operaciones mecánicas. Estos son los sólidos retenidos al pasar el agua residual a través de un filtro con apertura de poro de $0.45\ \mu\text{m}$. Además representa la fracción contaminante susceptible de ser eliminada por sedimentación, floculación o filtración. Lo constituyen las partículas inorgánicas (arcillas, arenas, entre otros) y orgánicas (células de algas, bacterias, entre otros). Por otro lado, los SSF son el residuo, luego, de calcinar los sólidos suspendidos totales durante un tiempo establecido a 550°C . Estos ofrecen una estimación de la cantidad de materia orgánica presente en la fracción sólida del agua residual. Por último, SSV representan a la fracción de sólidos suspendidos que se volatilizan a 600°C . Es decir, la pérdida de peso por ignición son los sólidos suspendidos volátiles.

1. RESULTADO DE LOS SST

Según el registro de los SST, durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio, para la magnitud y la eficiencia de los SST, en cada punto de monitoreo.

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de los SST, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo. Por un lado, para la magnitud de los SST, en el punto de monitoreo E-0, afluente de los humedales artificiales, se alcanzaron valores máximo de 196.0 mg/L, mínimo de 74.0 mg/L y promedio de 135.5 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 36.9 mg/L. En el punto de monitoreo H-1, efluente del humedal artificial con GRAVA, se alcanzaron valores máximo de 88 mg/L, mínimo de 52.0 mg/L y promedio de 70.0 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 11.23 mg/L. En el punto de monitoreo H-2, efluente del humedal artificial con PVC, se alcanzaron valores máximo de 69.0 mg/L, mínimo de 32 mg/L y promedio de 44.7 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 11.9 mg/L. Por otro lado, para la eficiencia de la turbiedad, en el humedal artificial con GRAVA, efluente del punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores máximo de 61.6%, mínimo de 26.9% y promedio de 45.7%; además, la desviación estándar fue 12.6%. En el humedal artificial con PVC, efluente del punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 79.9%, mínimo de 48.4% y promedio de 65.6%; además, la desviación estándar fue 9.0%.

A continuación, se muestra el registro de los SST, y los gráficos de la magnitud y la eficiencia de los SST durante el periodo de operación.

	MAÑANA		HORA	SST (mg/L)			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S01	Mi	28-ago	10:00	---	---	---	---	---
S02	Mi	04-sep	10:00	---	---	---	---	---
S03	Mi	11-sep	10:00	---	---	---	---	---
S04	Mi	18-sep	10:00	93.00	68.00	48.00	26.88%	48.39%
S05	Mi	25-sep	10:00	91.00	66.00	44.00	27.47%	51.65%
S06	Mi	02-oct	10:00	74.00	52.00	32.00	29.73%	56.76%
S07	Mi	09-oct	10:00	84.00	58.00	34.00	30.95%	59.52%
S08	Mi	16-oct	10:00	---	---	---	---	---
S09	Mi	23-oct	10:00	---	---	---	---	---
S10	Mi	30-oct	10:00	108.00	76.00	44.00	29.63%	59.26%
S11	Mi	06-nov	10:00	136.00	78.00	48.00	42.65%	64.71%
S12	Mi	13-nov	10:00	110.00	68.00	42.00	38.18%	61.82%
S13	Mi	20-nov	10:00	132.00	81.00	55.00	38.64%	58.33%
S14	Mi	27-nov	10:00	128.00	74.00	45.00	42.19%	64.84%
S15	Mi	04-dic	10:00	151.00	84.00	49.00	44.37%	67.55%
S16	Mi	11-dic	10:00	---	---	---	---	---
S17	Mi	18-dic	10:00	---	---	---	---	---
S18	Mi	25-dic	10:00	---	---	---	---	---
S19	Mi	01-ene	11:00	---	---	---	---	---
S20	Mi	08-ene	10:00	186.00	80.00	64.00	56.99%	65.59%
S21	Lu	13-ene	10:00	196.00	88.00	69.00	55.10%	64.80%
S22	Mi	22-ene	11:00	194.00	87.00	63.00	55.15%	67.53%
S23	Mi	29-ene	10:00	173.00	74.00	51.00	57.23%	70.52%
S24	Mi	05-feb	10:00	130.00	60.00	34.00	53.85%	73.85%
S25	Mi	12-feb	11:00	124.00	55.00	32.00	55.65%	74.19%
S26	Mi	19-feb	10:00	144.00	58.00	31.00	59.72%	78.47%
S27	Mi	26-feb	10:00	164.00	63.00	33.00	61.59%	79.88%
S28	Mi	03-mar	11:00	156.00	60.00	32.00	61.54%	79.49%

Cuadro IV-13

Registro de los sólidos suspendidos totales durante el periodo de operación.

Adaptada de fuente propia (2014).

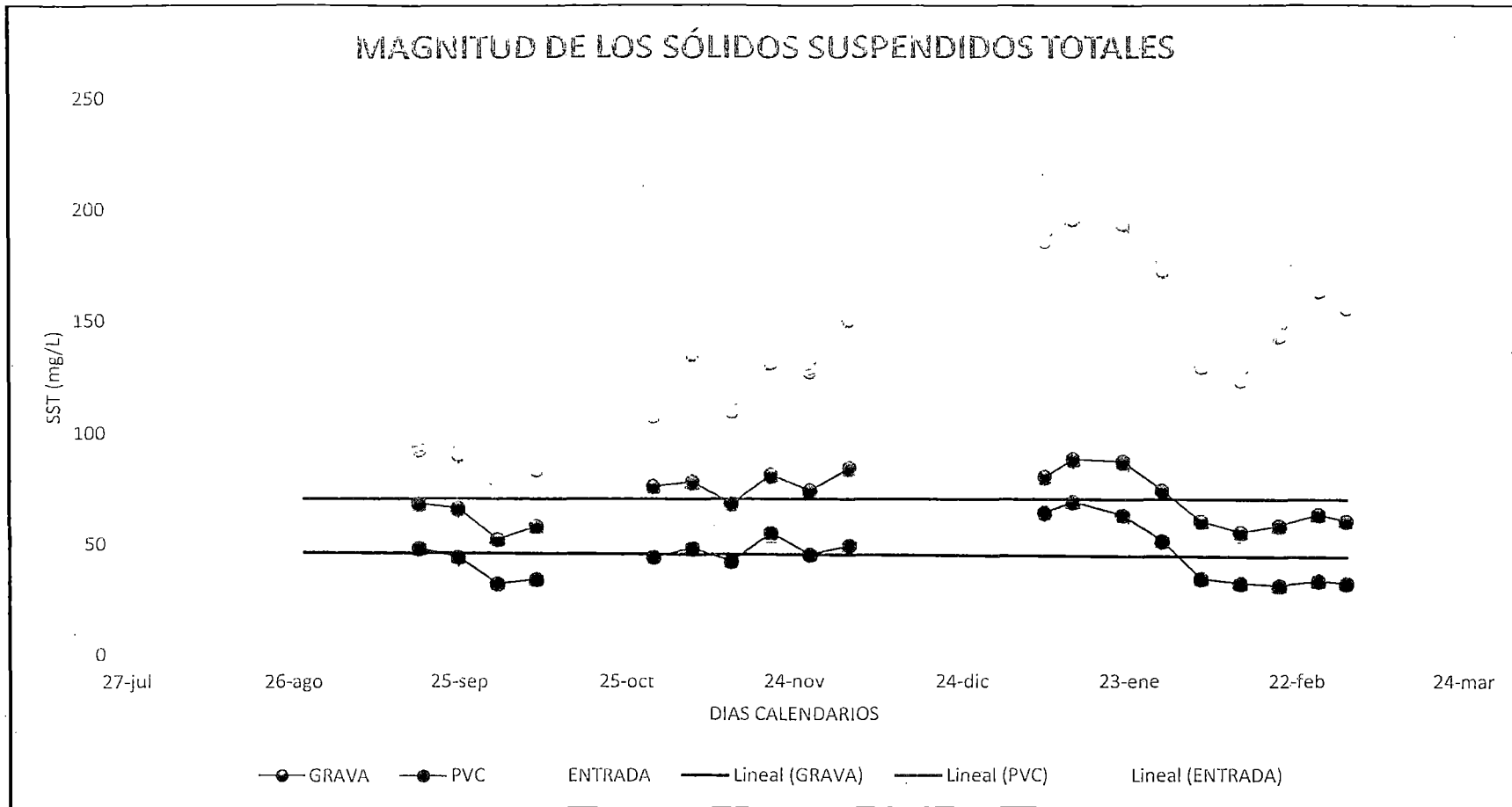


Gráfico IV-05

Registro de los sólidos suspendidos totales durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

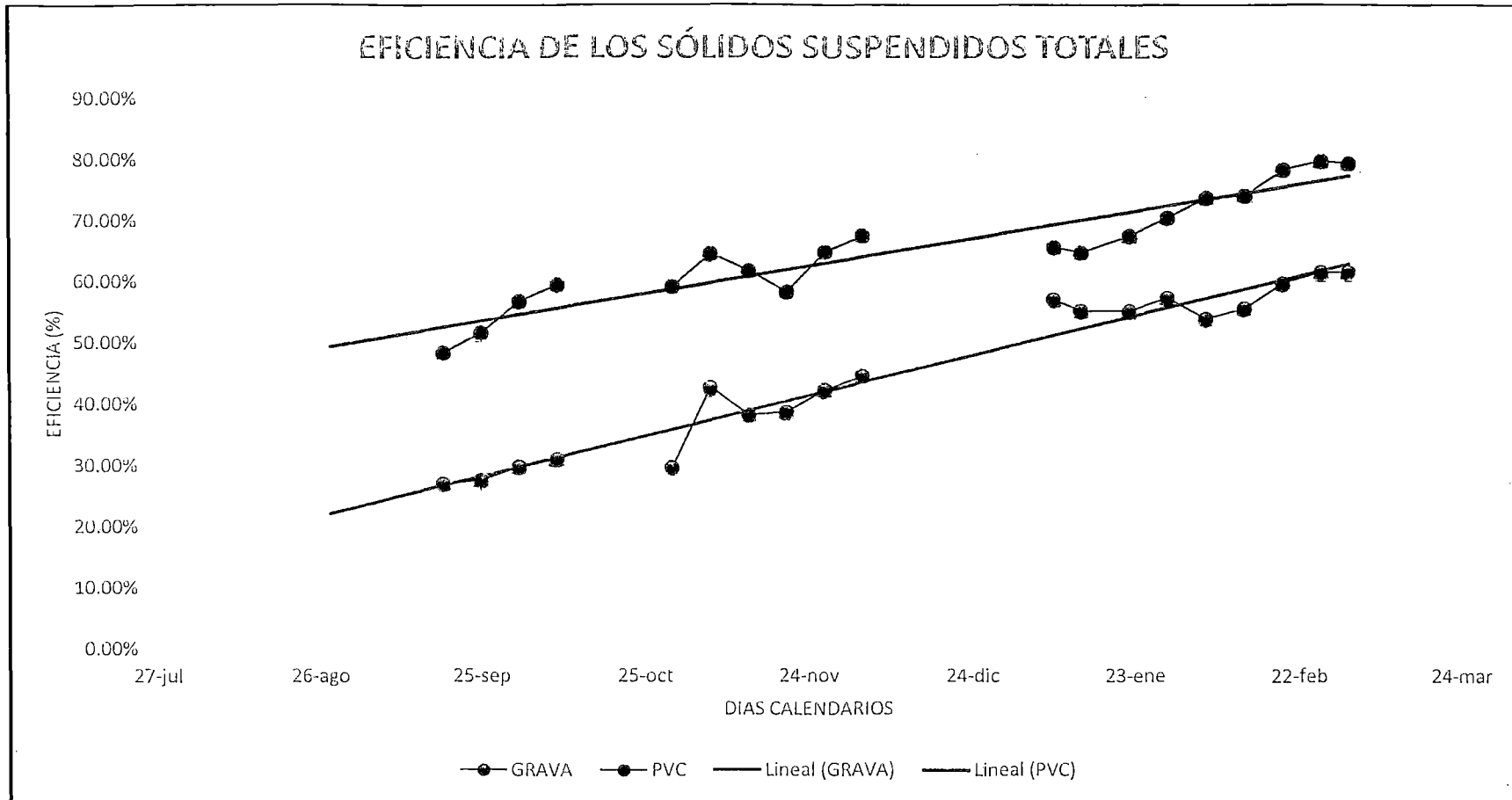


Gráfico IV-06

Remoción de los sólidos suspendidos totales durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

2. ANÁLISIS DE LOS SST

En el período de evaluación, para la magnitud y eficiencia de los sólidos en suspensión, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo, debido a que el sistema de humedales logró una consistencia del proceso biológico. Por un lado, las plantas acuáticas alcanzaron una alta densidad de vegetación; por ello, a través de las raíces y rizomas que filtraron las partículas en suspensión, se logró una elevada remoción de los sólidos en suspensión. Por otro lado, el agua residual tuvo un flujo lento; por ello, a través del mecanismo de sedimentación, se realizó la remoción de los sólidos suspendidos. Por último, la biopelícula alcanzó su máximo desarrollo; por ello, a través del mecanismo de absorción, se contribuyó a la remoción de los sólidos suspendidos.

Asimismo, en el periodo de evaluación, a pesar de que las magnitudes de los sólidos en suspensión presentaron un comportamiento semejante en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos de la operación, ya que la superficie específica del material filtrante, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron a favor de la remoción de los sólidos en suspensión. En consecuencia, el humedal artificial con PVC logró mayor eficiencia que el humedal artificial con GRAVA, incrementando gradualmente su valor en el tiempo; además, se observó que la diferencia de eficiencias de los sólidos en suspensión, entre ambos humedales, en promedio fue 20.0%; también, se percibió que, en promedio, el humedal artificial con PVC alcanzó la máxima eficiencia en la semana 27, mientras que el humedal artificial con GRAVA lo hizo en la semana 25; aparte de ello, se contempló que la eficiencia fue proporcional a la temperatura del agua residual.

Las desviaciones estándar, para la magnitud de los SST, fueron 36.9 mg/L, 11.23 mg/L y 11.9 mg/L, respectivamente, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que los SST del punto de monitoreo E-0 presentó mayor dispersión, respecto a su promedio, que de los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Asimismo, la turbiedad de los puntos de monitoreo H-1 y H-2 fueron valores confiables, dado que estos presentaron menor desviación estándar, a pesar de que los SST del punto de monitoreo E-0 tuvo alta dispersión. Para la eficiencia de la turbiedad, las desviaciones estándar fueron 12.6% y 9.0%, respectivamente, en los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Esto indica que la eficiencia de la turbiedad presentó similar rango de dispersión, en ambos humedales, respecto a sus valores promedio. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-2 fue, sutilmente, menor que en el punto de monitoreo H-1. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la remoción de los SST; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

3. RESULTADO DE LOS SSF

Según el registro de los SSF, durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio, para la magnitud y la eficiencia de los SSF, en cada punto de monitoreo.

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de los SSF, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo. Por un lado, para la magnitud de los SST, en el punto de monitoreo E-0, afluente de los humedales artificiales, se alcanzaron valores máximo de 88.0 mg/L, mínimo de 32.0 mg/L y promedio de 58.4 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 15.84 mg/L. En el punto de monitoreo H-1, efluente del humedal artificial con GRAVA, se alcanzaron valores máximo de 38 mg/L, mínimo de 20.0 mg/L y promedio de 29.5 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 5.1 mg/L. En el punto de monitoreo H-2, efluente del humedal artificial con PVC, se alcanzaron valores máximo de 31.0 mg/L, mínimo de 12.0 mg/L y promedio de 19.5 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 6.4 mg/L. Por otro lado, para la eficiencia de la turbiedad, en el humedal artificial con GRAVA, efluente del punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores máximo de 59.3%, mínimo de 20.5% y promedio de 47.1%; además, la desviación estándar fue 12.3%. En el humedal artificial con PVC, efluente del punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 79.4%, mínimo de 52.9% y promedio de 65.8%; además, la desviación estándar fue 9.0%.

A continuación, se muestra el registro de los SSF, y los gráficos de la magnitud y la eficiencia de los SSF durante el periodo de operación.

	FECHA		HORA	SSF (mg/L)			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S01	Mi	28-ago	10:00	---	---	---	---	---
S02	Mi	04-sep	10:00	---	---	---	---	---
S03	Mi	11-sep	10:00	---	---	---	---	---
S04	Mi	18-sep	10:00	39.00	31.00	18.00	20.51%	53.85%
S05	Mi	25-sep	10:00	38.00	27.00	16.00	28.95%	57.89%
S06	Mi	02-oct	10:00	32.00	24.00	14.00	25.00%	56.25%
S07	Mi	09-oct	10:00	34.00	22.00	16.00	35.29%	52.94%
S08	Mi	16-oct	10:00	---	---	---	---	---
S09	Mi	23-oct	10:00	---	---	---	---	---
S10	Mi	30-oct	10:00	56.00	34.00	15.00	39.29%	73.21%
S11	Mi	06-nov	10:00	60.00	26.00	15.00	56.67%	75.00%
S12	Mi	13-nov	10:00	44.00	20.00	14.00	54.55%	68.18%
S13	Mi	20-nov	10:00	59.00	28.00	24.00	52.54%	59.32%
S14	Mi	27-nov	10:00	58.00	36.00	26.00	37.93%	55.17%
S15	Mi	04-dic	10:00	67.00	38.00	28.00	43.28%	58.21%
S16	Mi	11-dic	10:00	---	---	---	---	---
S17	Mi	18-dic	10:00	---	---	---	---	---
S18	Mi	25-dic	10:00	---	---	---	---	---
S19	Mi	01-ene	11:00	---	---	---	---	---
S20	Mi	08-ene	10:00	74.00	34.00	28.00	54.05%	62.16%
S21	Lu	13-ene	10:00	88.00	36.00	29.00	59.09%	67.05%
S22	Mi	22-ene	11:00	86.00	35.00	31.00	59.30%	63.95%
S23	Mi	29-ene	10:00	70.00	32.00	25.00	54.29%	64.29%
S24	Mi	05-feb	10:00	57.00	28.00	16.00	50.88%	71.93%
S25	Mi	12-feb	11:00	56.00	26.00	12.00	53.57%	78.57%
S26	Mi	19-feb	10:00	61.00	27.00	15.00	55.74%	75.41%
S27	Mi	26-feb	10:00	68.00	29.00	15.00	57.35%	77.94%
S28	Mi	03-mar	11:00	63.00	27.00	13.00	57.14%	79.37%

Cuadro IV-14

Registro de los sólidos suspendidos fijos durante el periodo de operación.

Adaptada de fuente propia (2014).

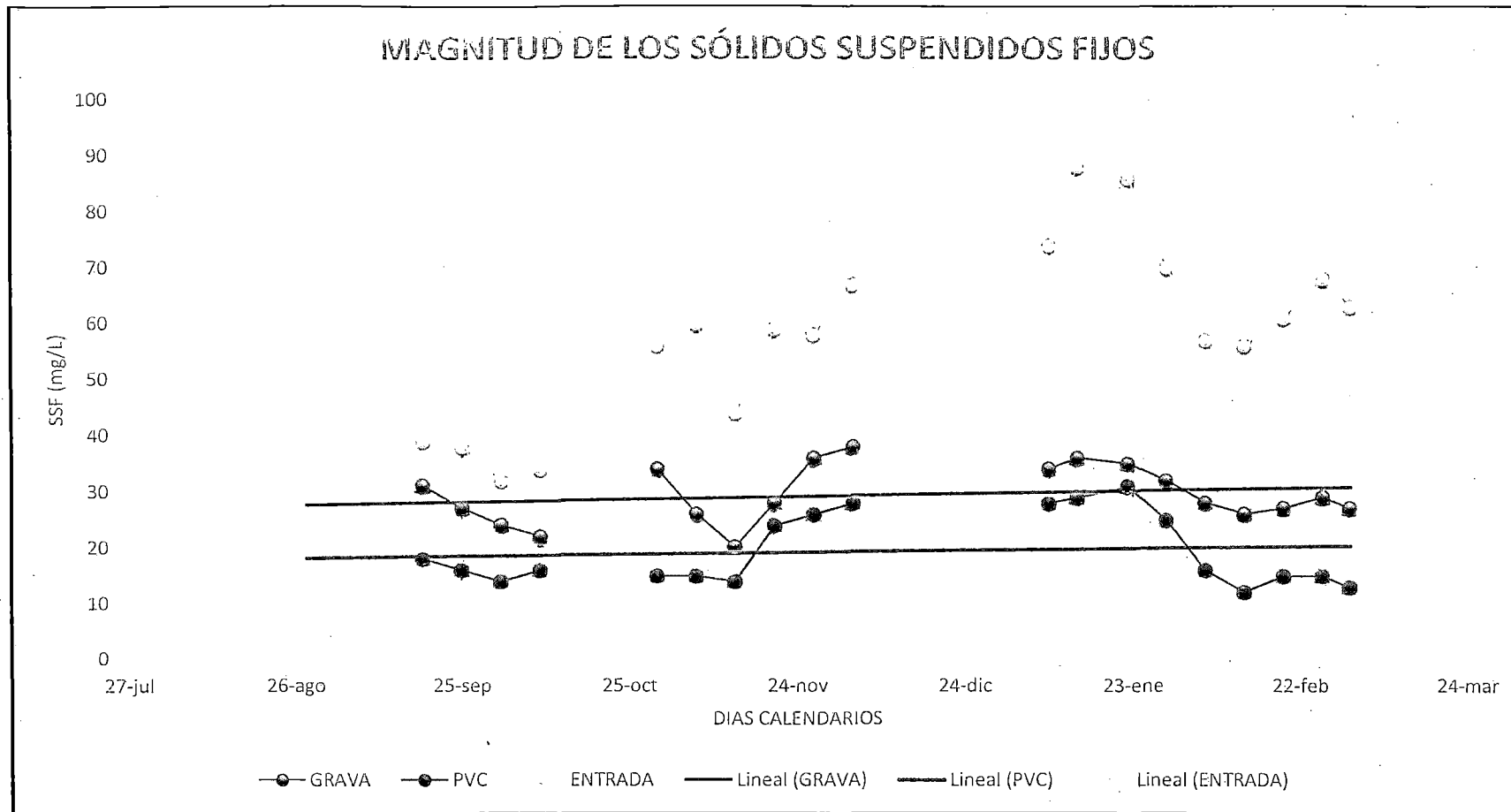


Gráfico IV-07

Registro de los sólidos suspendidos fijos durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

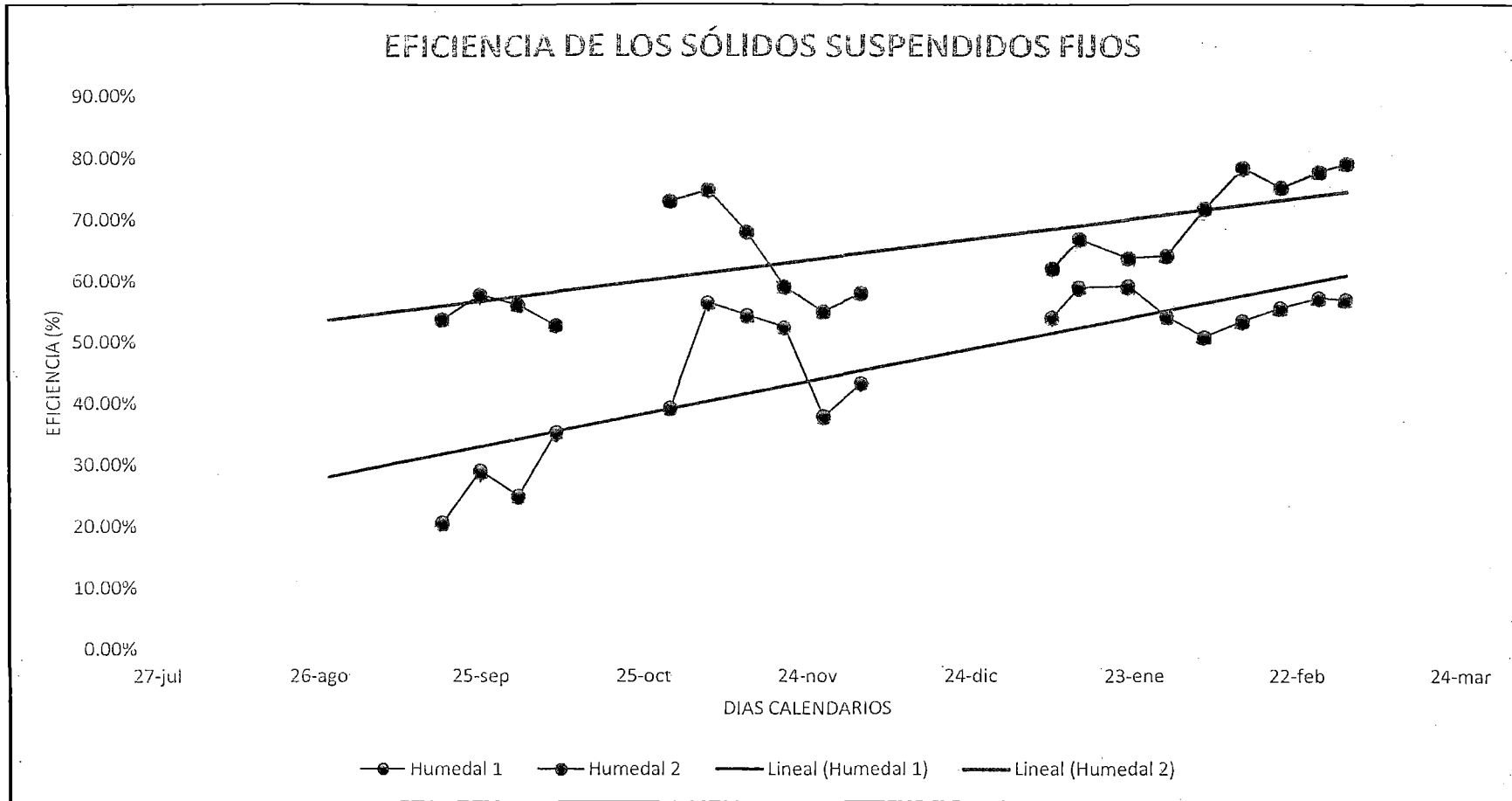


Gráfico IV-08

Remoción de los sólidos suspendidos fijos durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

4. ANÁLISIS DE LOS SSF

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de los sólidos en suspensión, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo, debido a que el sistema de humedales logró una consistencia del proceso biológico. Por un lado, las plantas acuáticas alcanzaron una alta densidad de vegetación; por ello, a través de las raíces y rizomas que filtraron las partículas en suspensión, se logró una elevada remoción de los sólidos en suspensión. Por otro lado, el agua residual tuvo un flujo lento; por ello, a través del mecanismo de sedimentación, se realizó la remoción de los sólidos suspendidos. Por último, la biopelícula alcanzó su máximo desarrollo; por ello, a través del mecanismo de absorción, se contribuyó a la remoción de los sólidos suspendidos.

Asimismo, en el periodo de evaluación, a pesar de que las magnitudes de los sólidos en suspensión presentaron un comportamiento semejante en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos de la operación, ya que la superficie específica del material filtrante, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron a favor de la remoción de los sólidos en suspensión. En consecuencia, el humedal artificial con PVC logró mayor eficiencia que el humedal artificial con GRAVA, incrementando gradualmente su valor en el tiempo; además, se observó que la diferencia de eficiencias de los sólidos en suspensión, entre ambos humedales, en promedio fue 20.0%; también, se percibió que, en promedio, el humedal artificial con PVC alcanzó la máxima eficiencia en la semana 27, mientras que el humedal artificial con GRAVA lo hizo en la semana 25; aparte de ello, se contempló que la eficiencia fue proporcional a la temperatura del agua residual.

Las desviaciones estándar, para la magnitud de los SSF, fueron 15.8 mg/L, 5.06 mg/L y 6.41 mg/L, respectivamente, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que los SSF del punto de monitoreo E-0 presentó mayor dispersión, respecto a su promedio, que de los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Asimismo, la turbiedad de los puntos de monitoreo H-1 y H-2 fueron valores confiables, dado que estos presentaron menor desviación estándar, a pesar de que los SSF del punto de monitoreo E-0 tuvo alta dispersión. Para la eficiencia de la turbiedad, las desviaciones estándar fueron 12.3% y 9.0%, respectivamente, en los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Esto indica que la eficiencia de la turbiedad presentó similar rango de dispersión, en ambos humedales, respecto a sus valores promedio. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-2 fue, sutilmente, menor que en el punto de monitoreo H-1. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la remoción de los SSF; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

5. RESULTADO DE LOS SSV

Según el registro de los SSV, durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio, para la magnitud y la eficiencia de los SSV, en cada punto de monitoreo.

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de los SSV, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo. Por un lado, para la magnitud de los SSV, en el punto de monitoreo E-0, afluente de los humedales artificiales, se alcanzaron valores máximo de 108.0 mg/L, mínimo de 42.0 mg/L y promedio de 77.0 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 21.6 mg/L. En el punto de monitoreo H-1, efluente del humedal artificial con GRAVA, se alcanzaron valores máximo de 53.0 mg/L, mínimo de 28.0 mg/L y promedio de 40.5 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 8.38 mg/L. En el punto de monitoreo H-2, efluente del humedal artificial con PVC, se alcanzaron valores máximo de 36.0 mg/L, mínimo de 16 mg/L y promedio de 26.3 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 7.5 mg/L. Por otro lado, para la eficiencia de la turbiedad, en el humedal artificial con GRAVA, efluente del punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores máximo de 64.6%, mínimo de 19.2% y promedio de 44.3%; además, la desviación estándar fue 15.4%. En el humedal artificial con PVC, efluente del punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 80.7%, mínimo de 44.2% y promedio de 64.0%; además, la desviación estándar fue 11.6%.

A continuación, se muestra el registro de los SSV, y los gráficos de la magnitud y la eficiencia de los SSV durante el periodo de operación.

	FECHA		HORA	SSV (mg/L)			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S01	Mi	28-ago	10:00	---	---	---	---	---
S02	Mi	04-sep	10:00	---	---	---	---	---
S03	Mi	11-sep	10:00	---	---	---	---	---
S04	Mi	18-sep	10:00	54.00	37.00	30.00	31.48%	44.44%
S05	Mi	25-sep	10:00	53.00	39.00	28.00	26.42%	47.17%
S06	Mi	02-oct	10:00	42.00	28.00	18.00	33.33%	57.14%
S07	Mi	09-oct	10:00	50.00	36.00	18.00	28.00%	64.00%
S08	Mi	16-oct	10:00	---	---	---	---	---
S09	Mi	23-oct	10:00	---	---	---	---	---
S10	Mi	30-oct	10:00	52.00	42.00	29.00	19.23%	44.23%
S11	Mi	06-nov	10:00	76.00	52.00	33.00	31.58%	56.58%
S12	Mi	13-nov	10:00	66.00	48.00	28.00	27.27%	57.58%
S13	Mi	20-nov	10:00	73.00	53.00	31.00	27.40%	57.53%
S14	Mi	27-nov	10:00	70.00	38.00	29.00	45.71%	58.57%
S15	Mi	04-dic	10:00	84.00	46.00	21.00	45.24%	75.00%
S16	Mi	11-dic	10:00	---	---	---	---	---
S17	Mi	18-dic	10:00	---	---	---	---	---
S18	Mi	25-dic	10:00	---	---	---	---	---
S19	Mi	01-ene	11:00	---	---	---	---	---
S20	Mi	08-ene	10:00	112.00	46.00	36.00	58.93%	67.86%
S21	Lú	13-ene	10:00	108.00	52.00	40.00	51.85%	62.96%
S22	Mi	22-ene	11:00	106.00	52.00	32.00	50.94%	69.81%
S23	Mi	29-ene	10:00	103.00	42.00	36.00	59.22%	65.05%
S24	Mi	05-feb	10:00	73.00	32.00	18.00	56.16%	75.34%
S25	Mi	12-feb	11:00	68.00	29.00	20.00	57.35%	70.59%
S26	Mi	19-feb	10:00	83.00	31.00	16.00	62.65%	80.72%
S27	Mi	26-feb	10:00	96.00	34.00	18.00	64.58%	81.25%
S28	Mi	03-mar	11:00	93.00	33.00	19.00	64.52%	79.57%

Cuadro IV-15

Registro de los sólidos suspendidos volátiles durante el periodo de operación.

Adaptada de fuente propia (2014).

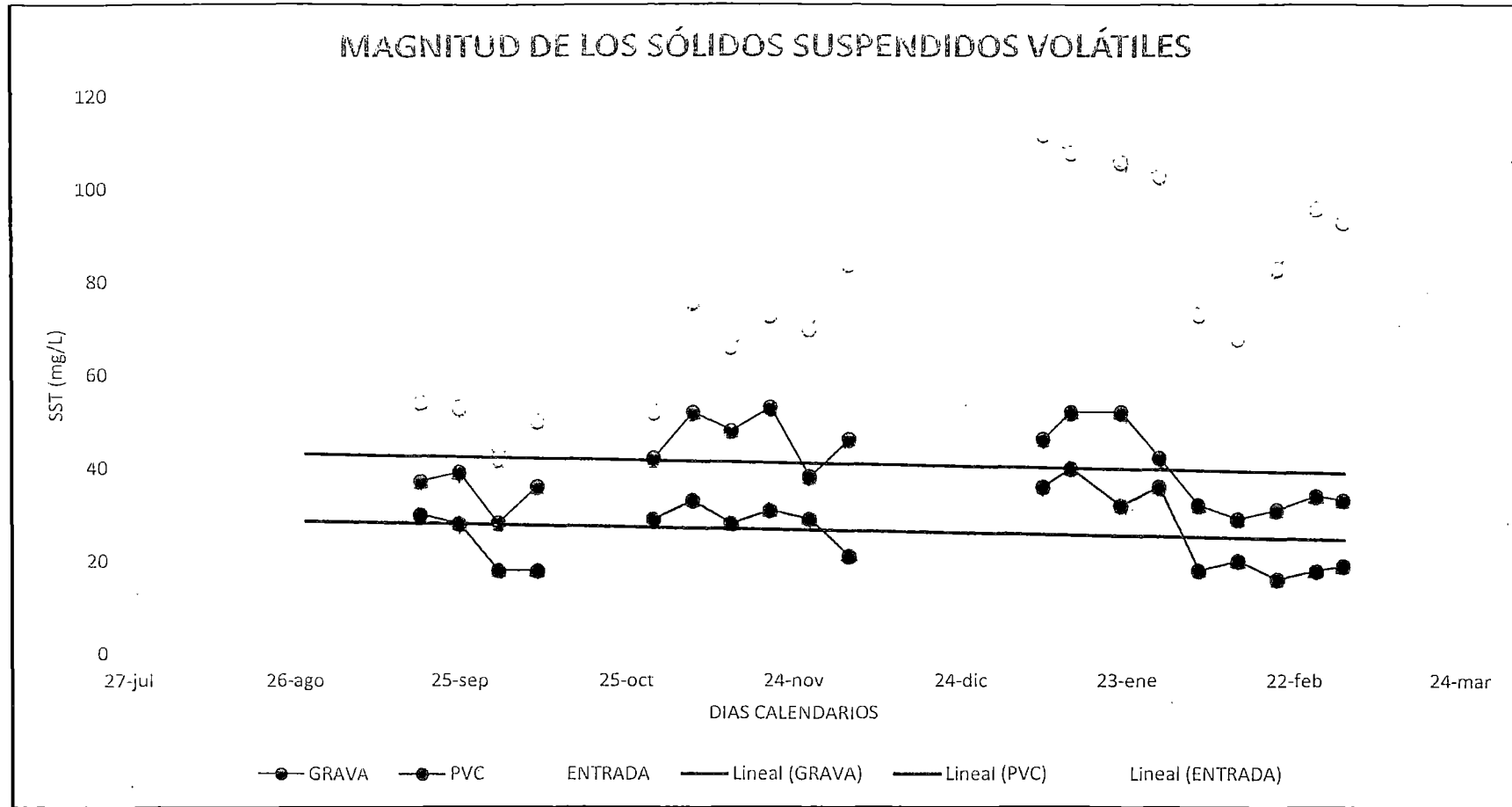


Gráfico IV-09
Registro de los sólidos suspendidos volátiles durante el periodo de operación de los humedales artificiales.
 Adaptada de fuente propia (2014).

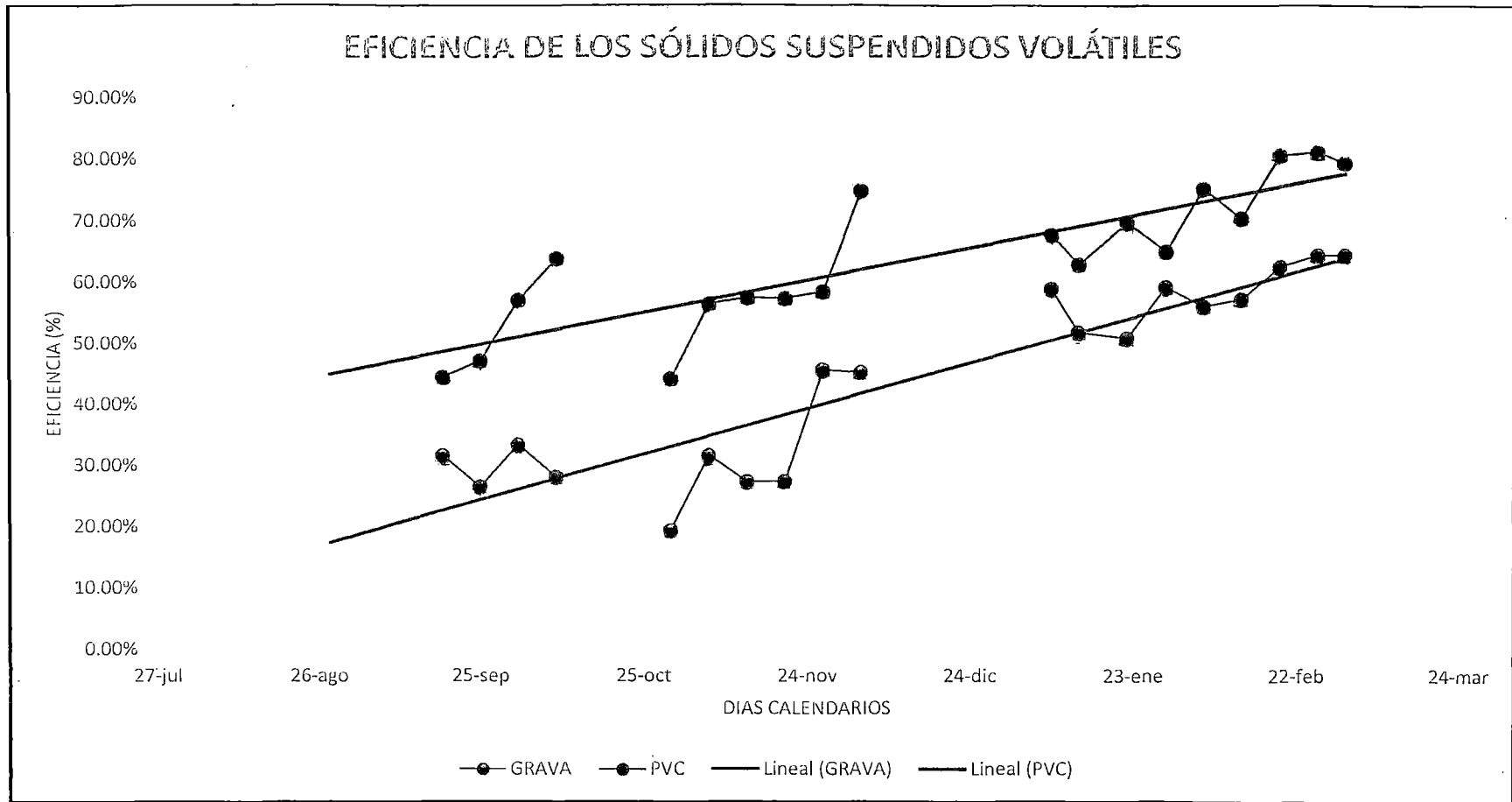


Gráfico IV-10

Remoción de los sólidos suspendidos volátiles durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

6. ANÁLISIS DE LOS SSV

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de los sólidos en suspensión, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo, debido a que el sistema de humedales logró una consistencia del proceso biológico. Por un lado, las plantas acuáticas alcanzaron una alta densidad de vegetación; por ello, a través de las raíces y rizomas que filtraron las partículas en suspensión, se logró una elevada remoción de los sólidos en suspensión. Por otro lado, el agua residual tuvo un flujo lento; por ello, a través del mecanismo de sedimentación, se realizó la remoción de los sólidos suspendidos. Por último, la biopelícula alcanzó su máximo desarrollo; por ello, a través del mecanismo de absorción, se contribuyó a la remoción de los sólidos suspendidos.

Asimismo, en el periodo de evaluación, a pesar de que las magnitudes de los sólidos en suspensión presentaron un comportamiento semejante en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos de la operación, ya que la superficie específica del material filtrante, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron a favor de la remoción de los sólidos en suspensión. En consecuencia, el humedal artificial con PVC logró mayor eficiencia que el humedal artificial con GRAVA, incrementando gradualmente su valor en el tiempo; además, se observó que la diferencia de eficiencias de los sólidos en suspensión, entre ambos humedales, en promedio fue 20.0%; también, se percibió que, en promedio, el humedal artificial con PVC alcanzó la máxima eficiencia en la semana 27, mientras que el humedal artificial con GRAVA lo hizo en la semana 25; aparte de ello, se contempló que la eficiencia fue proporcional a la temperatura del agua residual.

Las desviaciones estándar, para la magnitud de los SSV, fueron 21.6 mg/L, 8.4 mg/L y 7.5 mg/L, respectivamente, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que los SSV del punto de monitoreo E-0 presentó mayor dispersión, respecto a su promedio, que de los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Asimismo, la turbiedad de los puntos de monitoreo H-1 y H-2 fueron valores confiables, dado que estos presentaron menor desviación estándar, a pesar de que los SST del punto de monitoreo E-0 tuvo alta dispersión. Para la eficiencia de la turbiedad, las desviaciones estándar fueron 15.4% y 11.6%, respectivamente, en los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Esto indica que la eficiencia de la turbiedad presentó similar rango de dispersión, en ambos humedales, respecto a sus valores promedio. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-2 fue, sutilmente, menor que en el punto de monitoreo H-1. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la remoción de los SST; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

E. REGISTRO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

La demanda química de oxígeno (DQO) es el parámetro que mide las sustancias químicas reductoras, presentes en el agua residual. Las sustancias químicas reductoras captan parte del oxígeno existente para que sean oxidadas por medios químicos. Es decir, la DQO es una estimación de las materias oxidables, en el agua residual, cualquiera sea su origen: orgánico o mineral. Entonces, la DQO es mayor cuanto mayor es la concentración de las sustancias químicas reductoras en el agua residual. Por consiguiente, se considera un indicador de interés en el tratamiento de aguas residuales

1. RESULTADO DE LA DQO

Según el registro de la DQO, durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio, para la magnitud y la eficiencia de la DQO, en cada punto de monitoreo.

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de la DQO, se obtuvieron valores con una tendencia casi constante y en aumento a través del tiempo. Por un lado, para la magnitud de la DQO, en el punto de monitoreo E-0, afluente de los humedales artificiales, se alcanzaron valores máximo de 318.0 mg/L, mínimo de 199.0 mg/L y promedio de 276.7 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 30.5 mg/L. En el punto de monitoreo H-1, efluente del humedal artificial con GRAVA, se alcanzaron valores máximo de 258.0 mg/L, mínimo de 164.0 mg/L y promedio de 209.7 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 25.77 mg/L. En el punto de monitoreo H-2, efluente del humedal artificial con PVC, se alcanzaron valores máximo de 234.0 mg/L, mínimo de 132.0 mg/L y promedio de 177.68 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 25.6 mg/L. Por otro lado, para la eficiencia de la DQO, en el humedal artificial con GRAVA, efluente del punto de monitoreo H-

1, se alcanzaron valores máximo de 42.8%, mínimo de 13.45% y promedio de 23.67%; además, la desviación estándar fue 9.63%.

En el humedal artificial con PVC, efluente del punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 54.2%, mínimo de 27.6% y promedio de 35.34%; además, la desviación estándar fue 9.18%.

A continuación, se muestra el registro de la DQO, y los gráficos de la magnitud y la eficiencia de la DQO durante el periodo de operación.

	FECHA		HORA	DQO (mg/L)			EFICIENCIA	
				ENTRAD A (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S01	Vi	30-ago	10:00	---	---	---	---	---
S02	Vi	06-sep	10:00	---	---	---	---	---
S03	Vi	13-sep	10:00	---	---	---	---	---
S04	Vi	20-sep	10:00	275.00	238.00	199.00	13.45%	27.64%
S05	Vi	27-sep	10:00	250.00	214.00	180.00	14.40%	28.00%
S06	Vi	04-oct	10:00	243.00	201.00	171.00	17.28%	29.63%
S07	Vi	11-oct	10:00	248.00	200.00	175.00	19.35%	29.44%
S08	Vi	18-oct	10:00	---	---	---	---	---
S09	Vi	25-oct	10:00	---	---	---	---	---
S10	Vi	01-nov	10:00	264.00	212.00	180.00	19.70%	31.82%
S11	Vi	08-nov	10:00	283.00	230.00	195.00	18.73%	31.10%
S12	Vi	15-nov	10:00	272.00	220.00	186.00	19.12%	31.62%
S13	Vi	22-nov	10:00	290.00	238.00	201.00	17.93%	30.69%
S14	Vi	29-nov	10:00	242.00	204.00	177.00	15.70%	26.86%
S15	Vi	06-dic	10:00	199.00	164.00	132.00	17.59%	33.67%
S16	Vi	13-dic	10:00	---	---	---	---	---
S17	Vi	19-dic	10:00	---	---	---	---	---
S18	Vi	27-dic	10:00	---	---	---	---	---
S19	Vi	03-ene	10:00	---	---	---	---	---
S20	Vi	10-ene	10:00	272.00	218.00	191.00	19.85%	29.78%
S21	Vi	17-ene	10:00	318.00	258.00	234.00	18.87%	26.42%
S22	Vi	24-ene	10:00	279.00	215.00	186.00	22.94%	33.33%
S23	Vi	31-ene	10:00	316.00	241.00	201.00	23.73%	36.39%
S24	Vi	07-feb	10:00	302.00	210.00	178.00	30.46%	41.06%
S25	Vi	14-feb	11:00	303.00	201.00	168.00	33.66%	44.55%
S26	Vi	21-feb	10:00	308.00	180.00	150.00	41.56%	51.30%
S27	Vi	28-feb	10:00	299.00	171.00	137.00	42.8%	54.2%
S28	Vi	07-mar	11:00	294.00	169.00	135.00	42.5%	54.1%

Cuadro IV-16

Registro de la demanda química de oxígeno durante el periodo de operación.

Adaptada de fuente propia (2014).

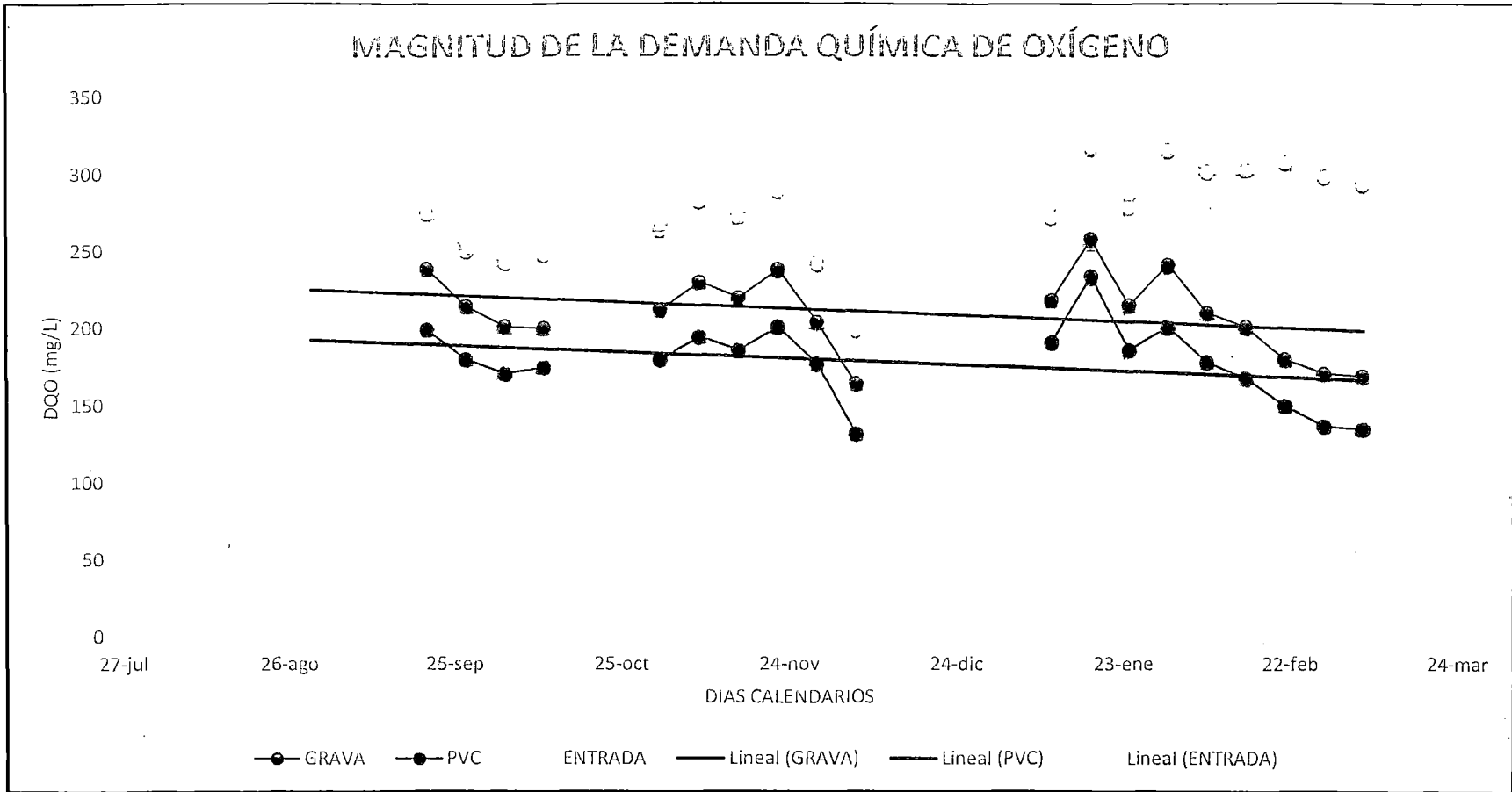


Gráfico IV-11
Registro de la demanda química de oxígeno durante el periodo de operación de los humedales artificiales.
 Adaptada de fuente propia (2014).

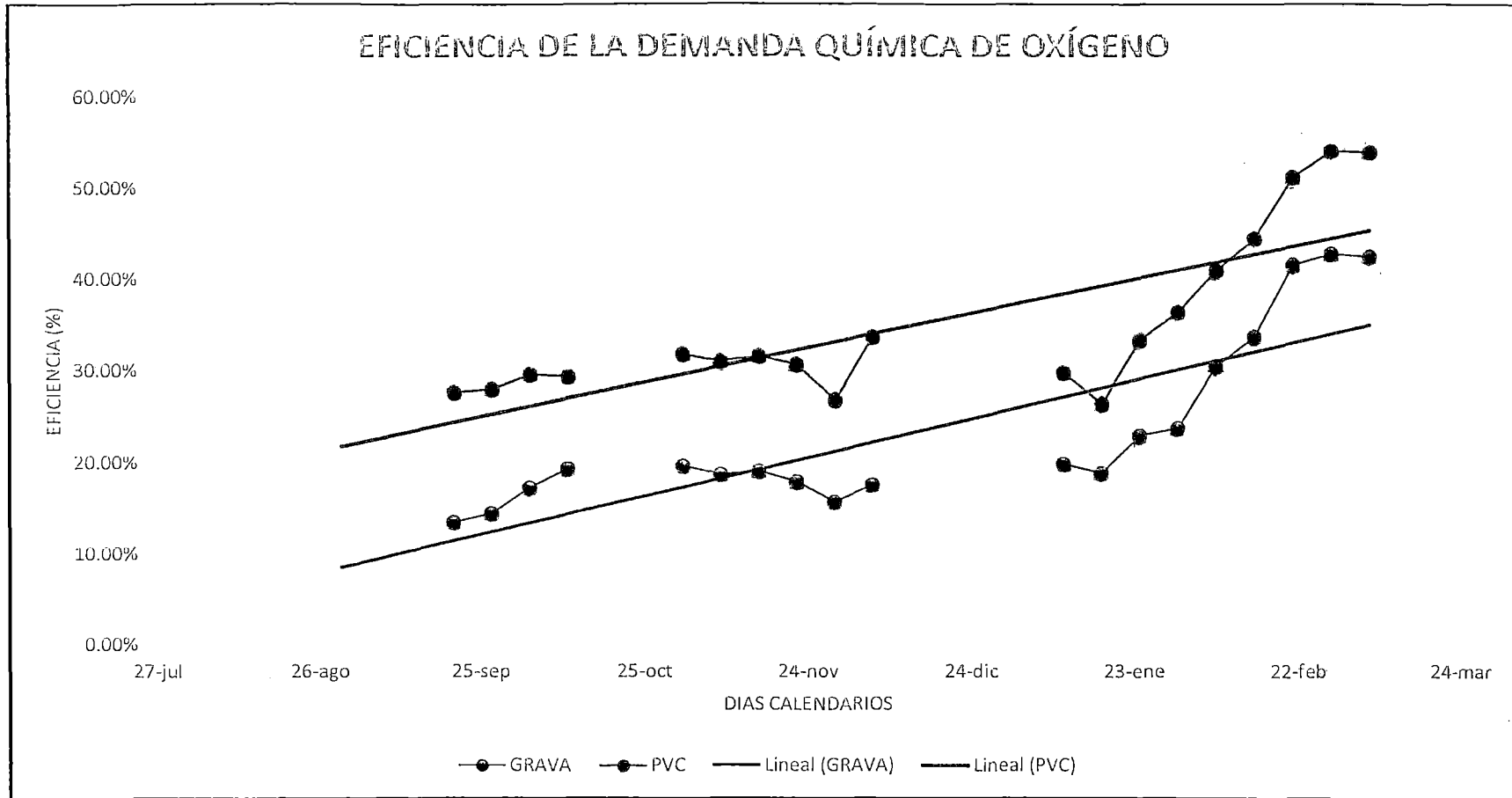


Gráfico IV-12

Remoción de la demanda química de oxígeno durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

2. ANÁLISIS DE LA DQO

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de la DQO, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo, debido a que el sistema de humedales logró una consistencia del proceso biológico. Por un lado, las plantas acuáticas alcanzaron una alta densidad de vegetación; por ello, a través de los microorganismos que crecieron en las raíces y rizomas, y oxidaron la materia de origen orgánico y mineral, se logró una elevada remoción de la DQO. Por otro lado, la biopelícula alcanzó su máximo desarrollo; por ello, a través de los microorganismos que se adhirieron a la biopelícula, y oxidaron la materia de origen orgánico y mineral, se contribuyó a la remoción de la DQO.

Asimismo, en el periodo de evaluación, a pesar de que las magnitudes de la DQO presentaron un comportamiento semejante en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos de la operación, ya que la superficie específica del material filtrante, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron a favor de la remoción de la DQO. En consecuencia, el humedal artificial con PVC logró mayor eficiencia que el humedal artificial con GRAVA, incrementando gradualmente su valor en el tiempo; además, se observó que la diferencia de eficiencias de la turbiedad, entre ambos humedales, en promedio fue 11.7%; también, se percibió que el humedal artificial con PVC alcanzó la máxima eficiencia en la semana 27, mientras que el humedal artificial con GRAVA, también, lo hizo en la semana 27; aparte de ello, se contempló que la eficiencia fue proporcional a la temperatura del agua residual.

Las desviaciones estándar, para la magnitud de la DQO, fueron 30.5 mg/L, 25.8 mg/L y 25.6, respectivamente, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que la DQO del punto de monitoreo E-0 presentó mayor dispersión, respecto a su promedio, que de los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Sin embargo, la DQO de los puntos de monitoreo H-1 y H-2 presentaron desviaciones estándar menores, pero no tan distantes. Es decir, la DQO de los puntos de monitoreo H-1 y H-2 fueron valores con alta dispersión, respecto a sus valores promedio, similar que la DQO del punto de monitoreo E-0, poco confiable. Para la eficiencia de la turbiedad, las desviaciones estándar fueron 9.6% y 9.2%, respectivamente, en los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Esto indica que la eficiencia de la DQO presentó similar rango de dispersión, en ambos humedales, respecto a sus valores promedio. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-2 fue, sutilmente, menor que en el punto de monitoreo H-1. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la remoción de la DQO; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

F. REGISTRO DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) es el parámetro que expresa la cantidad necesaria de oxígeno, para la degradación de la materia orgánica, por acción de los microorganismos. Asimismo, la DBO_5 , en la práctica, se utiliza para medir el grado de contaminación orgánica que existe en el agua residual. Entonces, la DBO_5 es mayor cuanto mayor es la concentración de las sustancias orgánicas reductoras. Por consiguiente, se considera un indicador de interés en el tratamiento de aguas residuales

1. RESULTADO DE LA DBO_5

Según el registro de la DBO_5 , durante el periodo de operación, se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio, para la magnitud y la eficiencia de la DBO_5 , en cada punto de monitoreo.

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de la DBO_5 , se obtuvieron valores con una tendencia casi constante y en aumento a través del tiempo. Por un lado, para la magnitud de la DBO_5 , en el punto de monitoreo E-0, afluente de los humedales artificiales, se alcanzaron valores máximo de 154.3 mg/L, mínimo de 99.1 mg/L y promedio de 126.9 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 17.5 mg/L. En el punto de monitoreo H-1, efluente del humedal artificial con GRAVA, se alcanzaron valores máximo de 85.4 mg/L, mínimo de 57.8 mg/L y promedio de 71.0 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 9.1 mg/L. En el punto de monitoreo H-2, efluente del humedal artificial con PVC, se alcanzaron valores máximo de 60.8 mg/L, mínimo de 39.1 mg/L y promedio de 47.3 mg/L; asimismo, la desviación estándar fue 7.4 mg/L. Por otro lado, para la eficiencia de la DBO_5 , en el humedal artificial con GRAVA, efluente del punto de monitoreo H-1, se alcanzaron valores máximo de 56.4%, mínimo de 34.3% y promedio de 43.5%; además, la desviación estándar fue 7.4%. En el humedal

artificial con PVC; efluente del punto de monitoreo H-2, se alcanzaron valores máximo de 72.8%, mínimo de 53.0% y promedio de 62.3%; además, la desviación estándar fue 6.61%.

A continuación, se muestra el registro de la DBO5, y los gráficos de la magnitud y la eficiencia de la DBO5 durante el periodo de operación.

	MAÑANA		HORA	DBO ₅			EFICIENCIA	
				ENTRADA (E0)	GRAVA (H1)	PVC (H2)	1-H1/E0	1-H2/E0
S01	Mi	28-ago	10:00	---	---	---	---	---
S02	Mi	04-sep	10:00	---	---	---	---	---
S03	Mi	11-sep	10:00	---	---	---	---	---
S04	Mi	18-sep	10:00	129.47	85.00	60.82	34.3%	53.0%
S05	Mi	25-sep	10:00	122.00	78.75	53.50	35.5%	56.1%
S06	Mi	02-oct	10:00	111.25	69.48	46.86	37.5%	57.9%
S07	Mi	09-oct	10:00	117.30	74.39	53.08	36.6%	54.7%
S08	Mi	16-oct	10:00	---	---	---	---	---
S09	Mi	23-oct	10:00	---	---	---	---	---
S10	Mi	30-oct	10:00	117.30	64.38	40.05	45.1%	65.9%
S11	Mi	06-nov	10:00	110.70	62.44	40.92	43.6%	63.0%
S12	Mi	13-nov	10:00	99.10	58.22	39.14	41.3%	60.5%
S13	Mi	20-nov	10:00	123.36	84.63	60.82	31.4%	50.7%
S14	Mi	27-nov	10:00	117.51	68.83	45.46	41.4%	61.3%
S15	Mi	04-dic	10:00	122.17	67.28	43.68	44.9%	64.2%
S16	Mi	11-dic	10:00	---	---	---	---	---
S17	Mi	18-dic	10:00	---	---	---	---	---
S18	Mi	25-dic	10:00	---	---	---	---	---
S19	Mi	01-ene	11:00	---	---	---	---	---
S20	Mi	08-ene	10:00	105.20	57.84	42.38	45.0%	59.7%
S21	Mi	15-ene	10:00	128.60	85.35	57.63	33.6%	55.2%
S22	Mi	22-ene	10:00	110.68	58.29	37.83	47.3%	65.8%
S23	Mi	29-ene	10:00	147.90	78.92	53.08	46.6%	64.1%
S24	Mi	05-feb	10:00	148.60	80.96	52.38	45.5%	64.8%
S25	Mi	12-feb	11:00	142.34	71.58	44.08	49.7%	69.0%
S26	Mi	19-feb	10:00	152.67	70.35	43.28	53.9%	71.7%
S27	Mi	26-feb	10:00	151.29	66.28	41.14	56.2%	72.8%
S28	Mi	03-mar	11:00	154.26	67.26	42.07	56.4%	72.7%

Cuadro IV-17

Registro de la demanda bioquímica de oxígeno durante el periodo de operación.

Adaptada de fuente propia (2014).

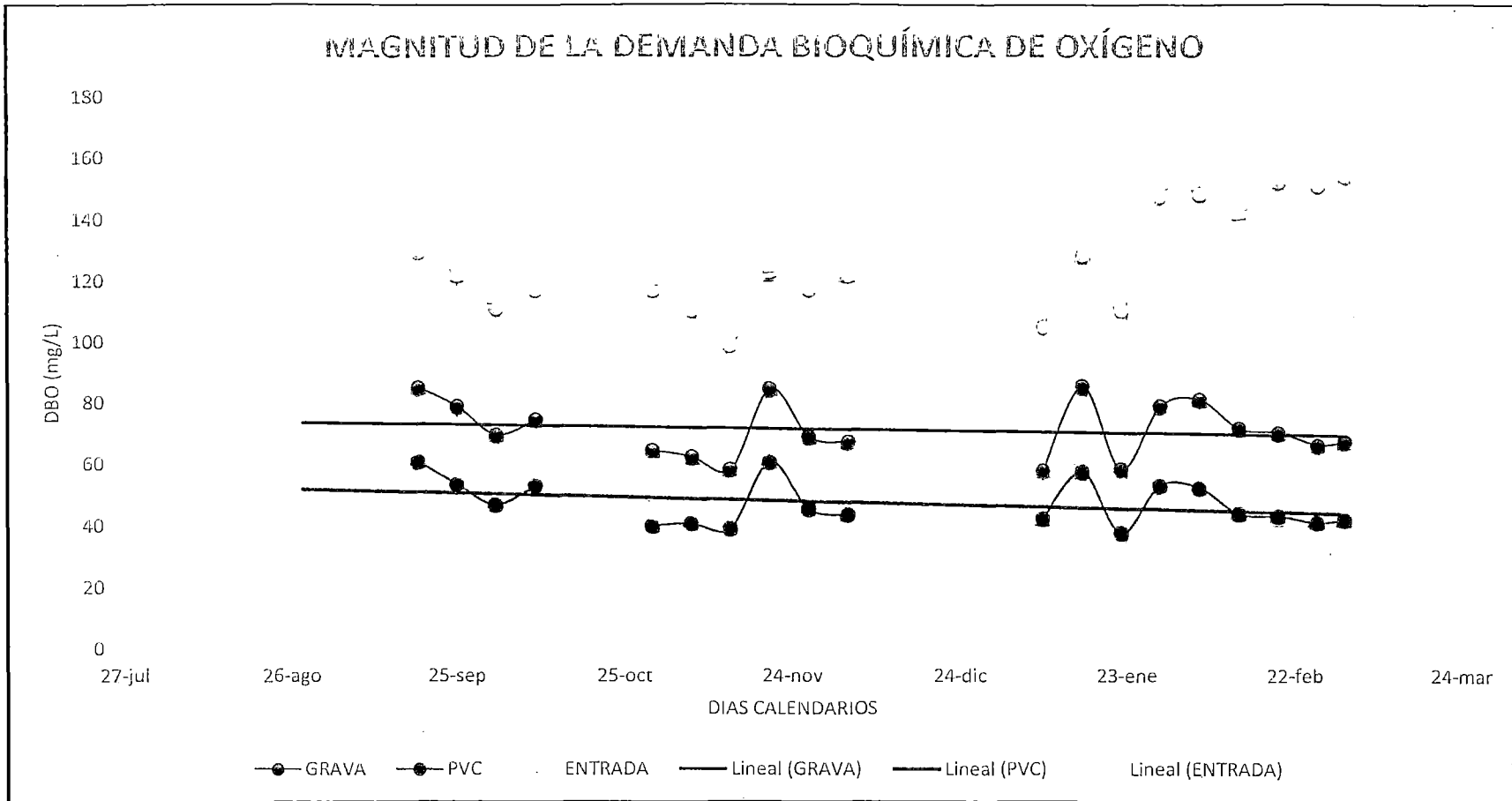


Gráfico IV-13
Registro de la demanda bioquímica de oxígeno durante el periodo de operación de los humedales artificiales.
 Adaptada de fuente propia (2014).

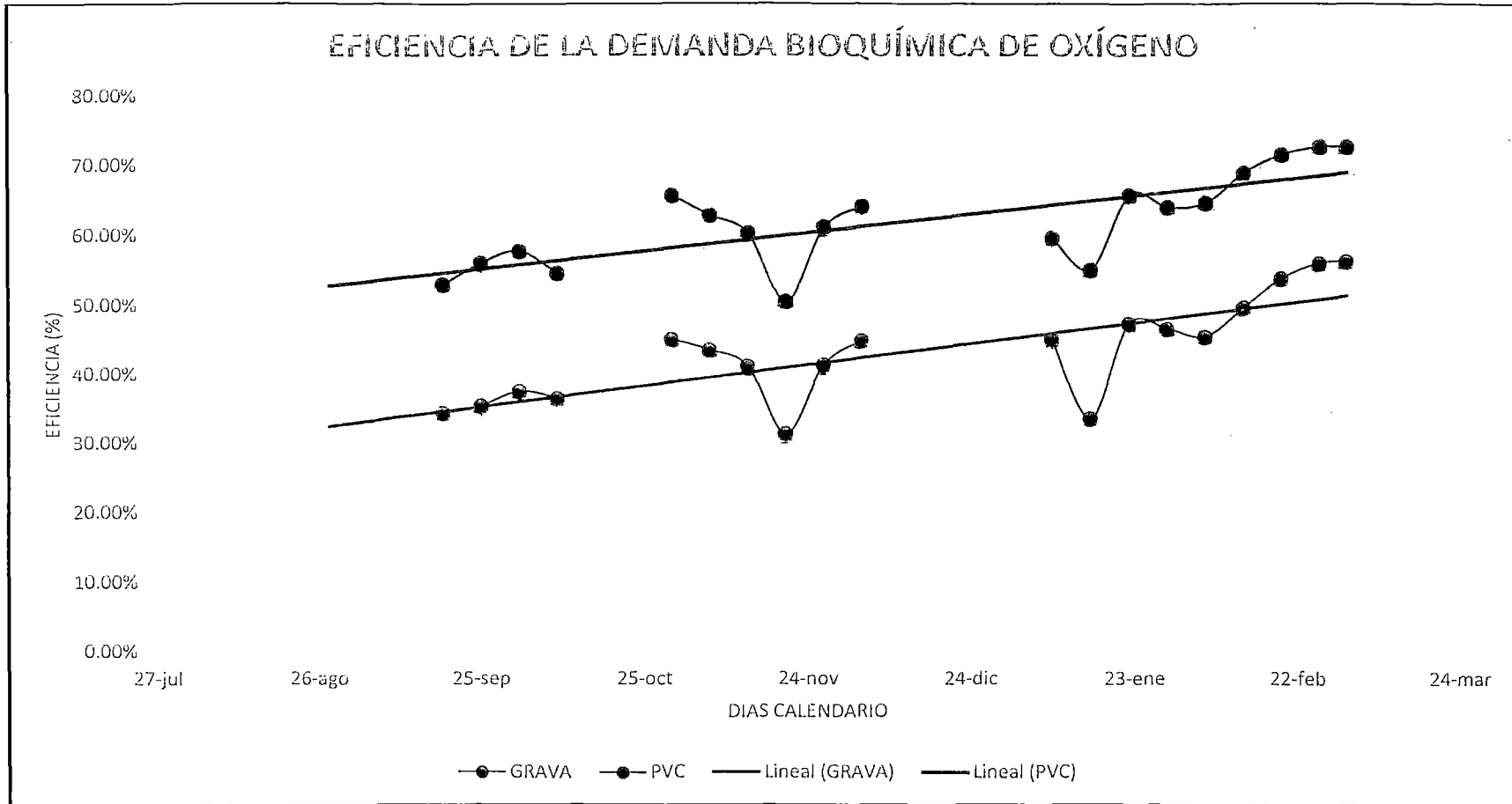


Gráfico IV-14

Remoción de la demanda bioquímica de oxígeno durante el periodo de operación de los humedales artificiales.

Adaptada de fuente propia (2014).

2. ANÁLISIS DE LA DBO₅

En el periodo de evaluación, para la magnitud y eficiencia de la DBO₅, se obtuvieron valores con una tendencia cuasi constante y en aumento a través del tiempo, debido a que el sistema de humedales logró una consistencia del proceso biológico. Por un lado, las plantas acuáticas alcanzaron una alta densidad de vegetación; por ello, a través de los microorganismos que crecieron en las raíces y rizomas, y degradaron la materia orgánica, se logró una elevada remoción de la DBO₅. Por otro lado, la biopelícula alcanzó su máximo desarrollo; por ello, a través de los microorganismos que se adhirieron a la biopelícula, y degradaron la materia orgánica, se contribuyó a la remoción de la DBO₅.

Asimismo, en el periodo de evaluación, a pesar de que las magnitudes de la DBO₅ presentaron un comportamiento semejante en ambos humedales, el humedal artificial con PVC obtuvo los valores más bajos de la operación, ya que la superficie específica del material filtrante, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron a favor de la remoción de la DBO₅. En consecuencia, el humedal artificial con PVC logró mayor eficiencia que el humedal artificial con GRAVA, incrementando gradualmente su valor en el tiempo; además, se observó que la diferencia de eficiencias de la turbiedad, entre ambos humedales, en promedio fue 18.8%; también, se percibió que el humedal artificial con PVC alcanzó la máxima eficiencia en la semana 28, mientras que el humedal artificial con GRAVA lo hizo en la semana 27; aparte de ello, se contempló que la eficiencia fue proporcional a la temperatura del agua residual.

Las desviaciones estándar, para la magnitud de la DBO₅, fueron 17.5 mg/L, 9.1 mg/L y 7.4, respectivamente, en los puntos de

monitoreo E-0, H-1 y H-2. Esto indica que la turbiedad del punto de monitoreo E-0 presentó mayor dispersión, respecto a su promedio, que de los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Asimismo, la turbiedad de los puntos de monitoreo H-1 y H-2 fueron valores confiables, dado que estos presentaron menor desviación estándar, a pesar de que la turbiedad del punto de monitoreo E-0 tuvo alta dispersión. Para la eficiencia de la turbiedad, las desviaciones estándar fueron 7.4% y 6.6%, respectivamente, en los puntos de monitoreo H-1 y H-2. Esto indica que la eficiencia de la DBO5 presentó similar rango de dispersión, en ambos humedales, respecto a sus valores promedio. Sin embargo, la desviación estándar en el punto de monitoreo H-2 fue, sutilmente, menor que en el punto de monitoreo H-1. En consecuencia, ambos humedales presentaron estabilidad en la remoción de la DBO5; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable que el humedal artificial con GRAVA.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS

A continuación se mencionan las principales conclusiones de la investigación.

A. SOBRE LA TURBIEDAD

- La remoción de la turbiedad se produjo por el mecanismo de filtración a través de las raíces y rizomas de la vegetación, por el mecanismo de sedimentación a través del flujo lento del agua residual y por el mecanismo de adsorción a través de biopelícula adherida al material filtrante.
- La eficiencia de la turbiedad en el humedal artificial con PVC fue superior, en 21.6% más, que la eficiencia de la turbiedad en el humedal artificial con GRAVA, debido a que la superficie específica del PVC corrugado, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron para lograr una mayor remoción de las partículas en suspensión, a través del mecanismo de adsorción.
- La eficiencia de la turbiedad, en el humedal artificial con PVC, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 48.6%, alcanzó el valor máximo de 85.34%
- La eficiencia de la turbiedad, en el humedal artificial con GRAVA, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 31.40%, alcanzó el valor máximo de 62.50%

- La máxima eficiencia de la turbiedad, en el humedal artificial con GRAVA, se alcanzó en la semana 18, mientras que, en el humedal artificial con PVC, se alcanzó, después, en la semana 26.
- Los humedales artificiales presentaron estabilidad en la remoción de la turbiedad, debido a la baja dispersión de sus valores; no obstante, el humedal artificial con GRAVA fue más estable.

B. SOBRE LA TEMPERATURA

- La temperatura, según el clima y las estaciones del año, fue proporcional a las eficiencias de los parámetros relacionados a la remoción de la materia orgánica, dado que elevadas temperaturas aumentaron la energía interna de los microorganismos que realizaron la degradación de la materia orgánica
- La temperatura en el afluente de los humedales artificiales, punto de monitoreo E-0, fue mayor que la temperatura en los efluentes de los humedales artificiales, puntos de monitoreo H-1 y H-2, debido a que el afluente provino del tanque de almacenamiento, el cual tuvo alta capacidad térmica.
- La temperatura, en el efluente del humedal artificial con PVC, punto de monitoreo H-2, hasta la semana 10, fue la más alta, mientras que, a partir de la semana 10, fue la más baja, debido a que el material filtrante, al tener mayor calor específico, no se enfrió ni se calentó con facilidad en bajas y altas temperaturas.
- La temperatura, en el efluente del humedal artificial con GRAVA, punto de monitoreo H-1, hasta la semana 10, fue la más baja, mientras que, a partir de la semana 10, fue la más alta, debido a

que el material filtrante, al tener menor calor específico, se enfrió y se calentó con mayor facilidad en bajas y altas temperaturas.

- Las máximas temperaturas, en el agua residual del sistema de humedales, de los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2, se alcanzaron en la semana 27.
- Los humedales artificiales presentaron estabilidad en la capacidad térmica, debido a la baja dispersión de sus valores; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable.

C. SOBRE EL pH

- El pH fue reflejo de la actividad microbiana que, degradando la materia orgánica, generó compuestos orgánicos simples que alteraron su valor.
- Los valores de pH en los efluentes de los humedales artificiales, puntos de monitoreo H-1 y H-2, fueron mayores que el valor de pH en el afluente de los humedales artificiales, punto de monitoreo E-0, debido a la actividad microbiana que, degradando la materia orgánica, generó compuestos orgánicos simples con bajas concentraciones de iones H^+ , lo que incrementó su valor.
- El valor del pH en el efluente del humedal artificial con PVC, punto de monitoreo H-2, fue menor que el valor de pH en el efluente del humedal artificial con GRAVA, punto de monitoreo H-1, debido al intercambio iónico, entre las moléculas del PVC y el agua residual, que generó compuestos con iones de H^+ que disminuyeron su valor.

- La gradiente de pH en el humedal artificial con PVC fue mayor que la gradiente de pH en el humedal artificial con GRAVA, debido a la mayor concentración de microorganismos, adheridos a la extensa superficie del PVC corrugado, que degradaron la materia orgánica, como parte de la actividad microbiana.
- Los máximos valores de pH, en el agua residual del sistema de humedales, de los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2, se alcanzaron en la semana 18.
- Los humedales artificiales presentaron estabilidad en la capacidad buffer para regular el pH, debido a la baja dispersión de sus valores; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable.
- El valor del pH fue proporcional a las eficiencias de los parámetros relacionados a la remoción de la materia orgánica, debido al desarrollo de la biopelícula para la actividad microbiana.

D. SOBRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS

- La remoción de los sólidos suspendidos se produjo por el mecanismo de filtración a través de las raíces y rizomas de la vegetación, por el mecanismo de sedimentación a través del flujo lento del agua residual y por el mecanismo de adsorción a través de biopelícula adherida al material filtrante.
- La eficiencia de los sólidos suspendidos en el humedal artificial con PVC fue superior, en 20.0% más, que la eficiencia de los sólidos suspendidos en el humedal artificial con GRAVA, debido a que la superficie específica del PVC corrugado, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un

prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron para lograr una mayor remoción de las partículas en suspensión, a través del mecanismo de adsorción.

- La eficiencia de los sólidos suspendidos, en el humedal artificial con PVC, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 48.4%, alcanzó el valor máximo de 79.9%
- La eficiencia de los sólidos suspendidos, en el humedal artificial con GRAVA, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 26.9%, alcanzó el valor máximo de 61.6%
- La máxima eficiencia de los sólidos suspendidos, en el humedal artificial con GRAVA, se alcanzó en la semana 25, mientras que, en el humedal artificial con PVC, se alcanzó, después, en la semana 27.
- Los humedales artificiales presentaron estabilidad en la remoción de los sólidos suspendidos, debido a la baja dispersión de sus valores; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable.

E. SOBRE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

- La remoción de la DQO se produjo por el mecanismo de adsorción, a través de la oxidación de la materia de origen orgánico y mineral, mediante la acción de los microorganismos aerobios y anaerobios adheridos a la superficie del material filtrante, y a las raíces y rizomas de la vegetación.
- La eficiencia de la DQO en el humedal artificial con PVC fue superior, en 11.7% más, que la eficiencia de la DQO en el humedal

artificial con GRAVA, debido a que la debido a que la superficie específica del PVC corrugado, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron para lograr una mayor remoción de la DQO, a través de la oxidación de la materia de origen orgánico y mineral.

- La eficiencia de la DQO, en el humedal artificial con PVC, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 27.6%, alcanzó el valor máximo de 54.2%
- La eficiencia de la DQO, en el humedal artificial con GRAVA, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 13.5%, alcanzó el valor máximo de 42.8%
- La máxima eficiencia de la DQO, en el humedal artificial con GRAVA, se alcanzó en la semana 27, mientras que, en el humedal artificial con PVC, también, se alcanzó en la semana 27.
- Los humedales artificiales presentaron estabilidad en la remoción de la DQO, debido a la baja dispersión de sus valores; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable.

F. SOBRE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

- La remoción de la DBO5 se produjo por el mecanismo de adsorción, a través de la degradación de la materia orgánica, mediante la acción de los microorganismos aerobios y anaerobios adheridos a la superficie del material filtrante, y a las raíces y rizomas de la vegetación.

- La eficiencia de la DBO5 en el humedal artificial con PVC fue superior, en 18.8% más, que la eficiencia de la DBO5 en el humedal artificial con GRAVA, debido a que la superficie específica del PVC corrugado, con el máximo desarrollo de la biopelícula, y el tiempo de retención hidráulico, con un prolongado periodo de contacto entre la biopelícula y el agua residual, influyeron para lograr una mayor remoción de la DBO5, a través de la degradación de la materia orgánica.
- La eficiencia de la DBO5, en el humedal artificial con PVC, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 53.0%, alcanzó el valor máximo de 72.8%
- La eficiencia de la DBO5, en el humedal artificial con GRAVA, manteniéndose, en todo momento, sobre valores de 34.3%, alcanzó el valor máximo de 56.4%
- La máxima eficiencia de la DBO5, en el humedal artificial con GRAVA, se alcanzó en la semana 27, mientras que, en el humedal artificial con PVC, también, se alcanzó en la semana 28.
- Los humedales artificiales presentaron estabilidad en la remoción de la DBO5, debido a la baja dispersión de sus valores; no obstante, el humedal artificial con PVC fue más estable.
- La biodegradabilidad, en promedio, de la relación DBO5/DQO, en los puntos de monitoreo E-0, H-1 y H-2 presentó, respectivamente, los valores 0.46, 0.34 y 0.27. En consecuencia, en un tratamiento alterno, el punto de monitoreo E-0 es apto para ser depurado mediante cualquier proceso biológico, mientras que, en un

siguiente tratamiento, los puntos de monitoreo H-1 y H-2 son aptos para ser depurados mediante biofiltros o lagunas de estabilización.

G. SOBRE LAS PLANTAS ACUÁTICAS

- El crecimiento de las plantas acuáticas, en el humedal artificial con GRAVA, a una razón de 0.12 metro por semana, fue mayor que el crecimiento de las plantas acuáticas, en el humedal artificial con PVC, a una razón de 0.10 metro por semana,
- Las plantas acuáticas, en el humedal artificial con GRAVA, tuvieron el mejor desarrollo, debido a que la GRAVA tiene nutrientes adicionales que no están presentes en el agua residual y que favorece el crecimiento de las plantas; asimismo, la GRAVA es un material consistente y fue buen soporte para el crecimiento de las plantas.
- Las plantas acuáticas, en el humedal artificial con PVC, tuvieron el menor desarrollo, debido a que el PVC es un material inerte que no le aportó ningún tipo de nutriente a las plantas; asimismo, el PVC es un material que flota en el agua y no fue buen soporte para el crecimiento de las plantas.

H. SOBRE EL MATERIAL FILTRANTE

- La selección apropiada del material filtrante es fundamental para el proceso biológico, debido a que esta se relaciona, directamente, con la eficiencia en remoción de materia orgánica del humedal artificial

- El PVC corrugado tuvo mayor superficie específica, debido a que, al ser un cuerpo superficial, presentó doble capa superficial: externa e interna.
- La GRAVA tuvo menor superficie específica, debido a que, al ser un cuerpo sólido, presentó una capa superficial.
- El PVC tuvo mayor calor específico, por ello, al absorber más energía térmica, no se calentó significativamente.
- La GRAVA tuvo menor calor específico, por ello, al absorber más energía térmica, se calentó significativamente.

I. SOBRE EL HUMEDAL ARTIFICIAL

- El humedal artificial con PVC corrugado, como material filtrante, es una opción técnica apropiada para el tratamiento de aguas residuales, debido a su bajo costo de inversión y su elevada eficiencia en la remoción de los parámetros relacionados a la presencia de materia orgánica, ya que al ser implementado sería rentable económicamente y tendría un buen rendimiento operativo.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación se mencionan las principales recomendaciones de la investigación:

A. SOBRE EL HUMEDAL ARTIFICIAL

- Se recomienda adicionar puntos de muestreo, a lo largo de la estructura del humedal artificial con PVC corrugado, para obtener referencias sobre el comportamiento que tienen los parámetros de calidad del agua residual desde el afluente hasta el efluente del humedal.
- Se recomienda realizar el mantenimiento frecuente de las instalaciones del humedal artificial, en el sistema distribuidor de caudal y en el sistema recolector de caudal, para evitar que las partículas de materia orgánica queden retenidas en los orificios de la tubería y que las partículas de color blanco, adheridas a las paredes internas de las tuberías, afecten la calidad de la muestra del agua residual.
- Se recomienda instalar el sistema recolector de caudal con una caja de recolección a través de una conexión independiente, con el fin de que se deposite el efluente residual sin tener conexiones cruzadas, para su posterior disposición final a la red de alcantarillado.

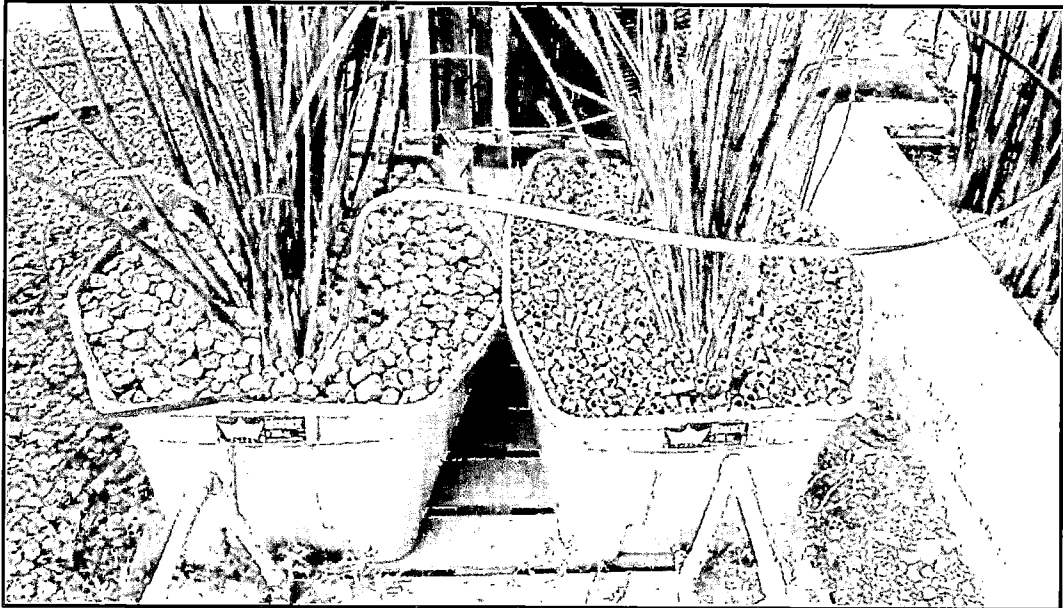
B. SOBRE LA INVESTIGACIÓN

- Se recomienda investigar el rendimiento del humedal artificial con PVC bajo diferentes condiciones climatológicas y de diseño hidráulico para obtener referencias sobre bajo qué condiciones se tiene mejor rendimiento.
- Se recomienda investigar el rendimiento del humedal artificial con PVC, en la remoción de nutrientes y patógenos, dado que se espera que los mecanismos de remoción de materia orgánica sean válidos también para los nutrientes y patógenos.
- Se recomienda investigar el rendimiento del humedal artificial con PVC corrugado, teniendo como afluente agua residual de origen industrial, debido a que se espera que los mecanismos de remoción tengan un elevado rendimiento en aguas residuales industriales.
- Se recomienda investigar el rendimiento del humedal artificial con PVC corrugado, teniendo como afluente agua residual con mayor carga orgánica, por ejemplo, el efluente del tanque séptico o, inclusive, del pre-tratamiento, dado que el material filtrante, al tener alta porosidad, no presentaría mayores obstrucciones al paso del flujo hidráulico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

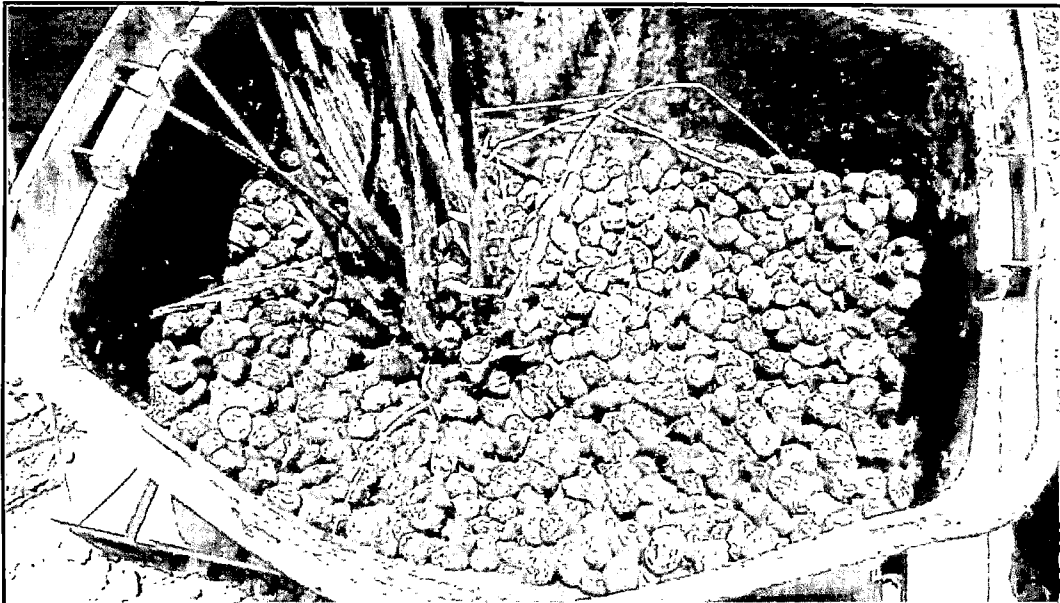
- Mariano Seoáñez Calvo (1999), **Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales**, Madrid, España.
- Mariano Seoáñez Calvo (2005), **Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo**, Madrid, España.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009), **Norma de Saneamiento S.090: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales**, Lima, Perú.
- Metcalf & Eddy (1991), **Wastewater Engineering – Treatment, disposal and reuse**, New York, USA.
- American Public Health Association – APHA (1981), **Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 5th. Edition, Washington D.C., USA.
- Enrique Jimeno Blasco (1998), **Análisis de Aguas y Desagües**, 2da. Edición, Lima, Perú.
- Victor Maldonado Yactayo (2005), **Uso de Wetlands para el tratamiento y reuso de aguas residuales domésticas**, Lima, Perú
- Lenntech, www.lenntech.es Water Treatment Solution

ANEXO: PANEL FOTOGRÁFICO



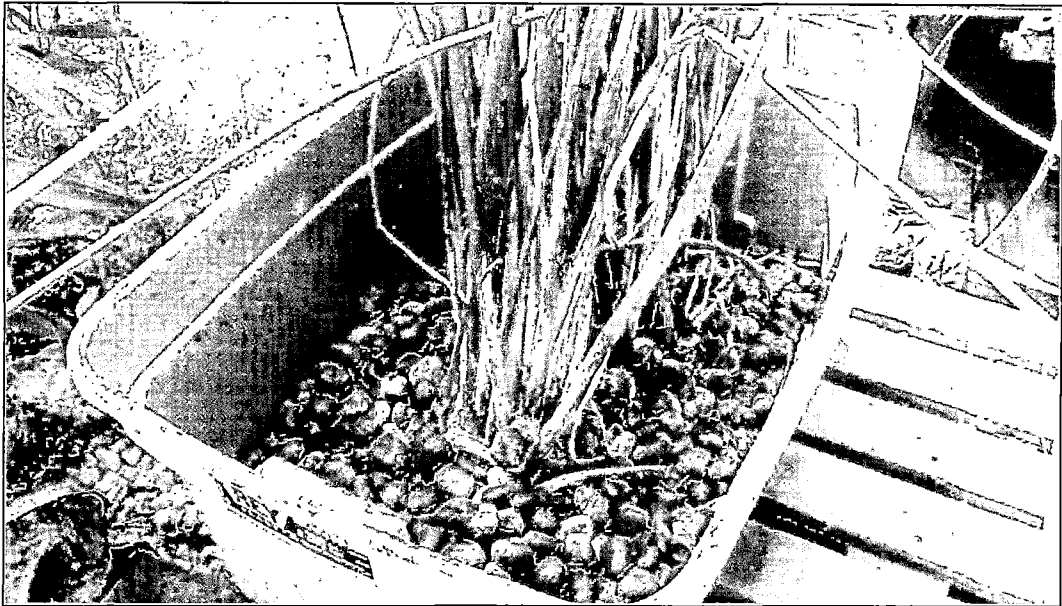
Fotografía 01
Muestra humedales artificiales en operación

Adaptada de fuente propia (2014).

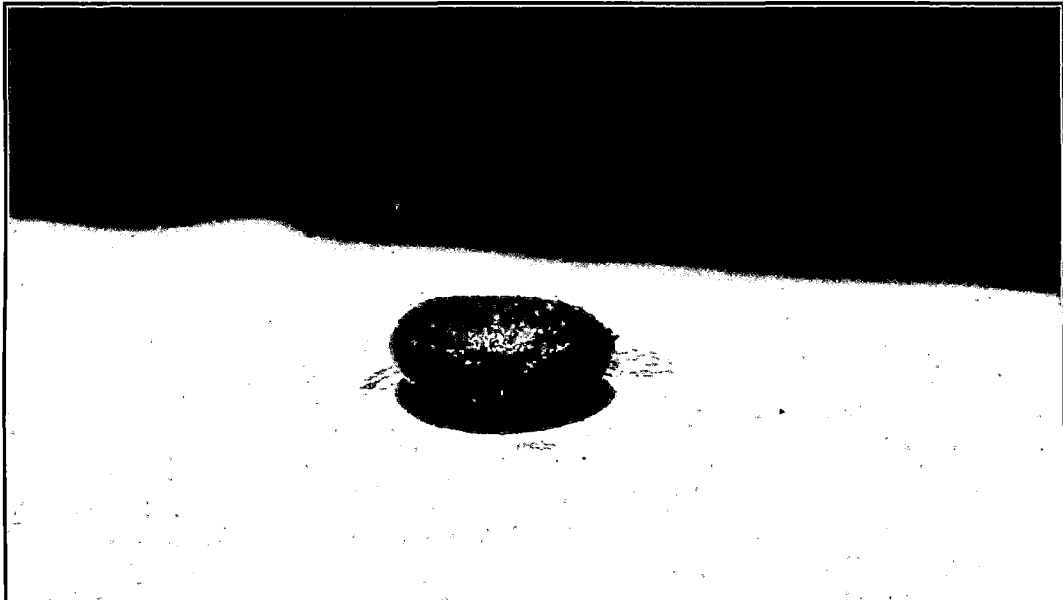


Fotografía 02
Muestra interior del medio filtrante: grava interna cubierta por la biopelícula

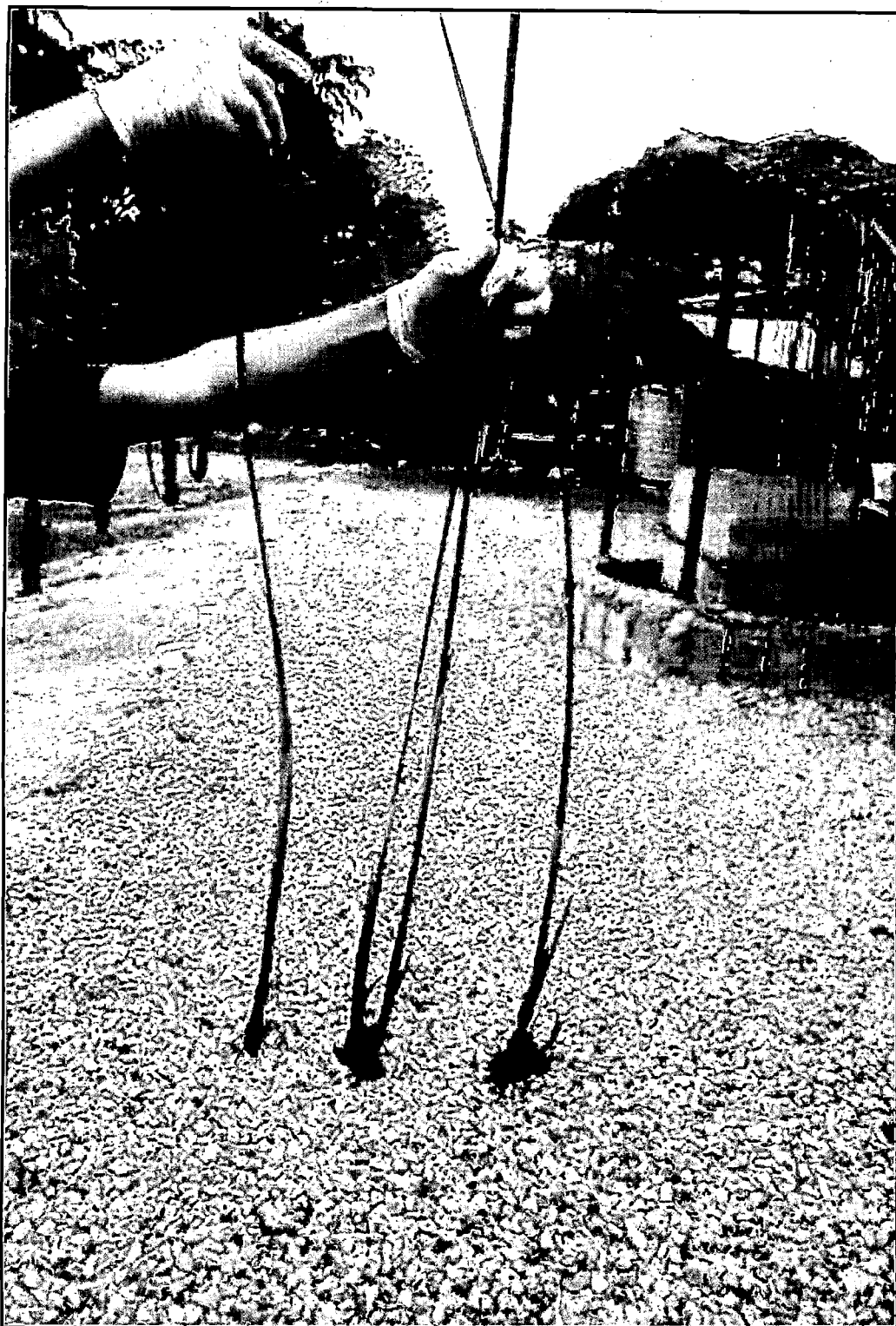
Adaptada de fuente propia (2014).



Fotografía 03
Muestra interior del medio filtrante: raíces de totora expuestas al ambiente
Adaptada de fuente propia (2014).



Fotografía 04
Muestra grava recubierta por la biopelícula adherida a la superficie.
Adaptada de fuente propia (2014).



Fotografía 05

Muestra tres raíces de totora al iniciar el periodo de operación

Adaptada de fuente propia (2014).



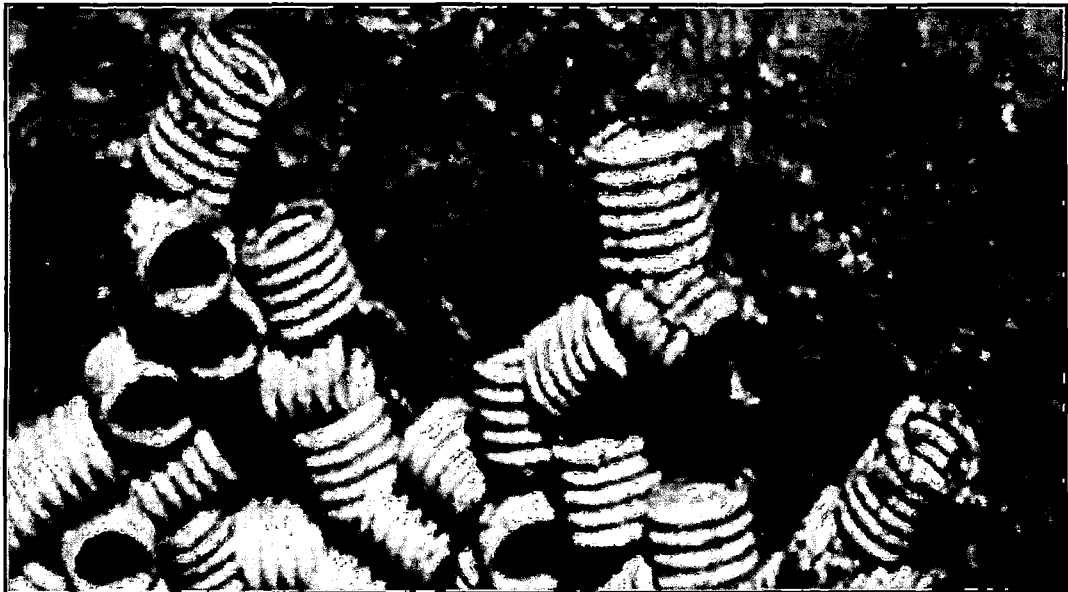
Fotografía 06

Muestra una raíz de totora al finalizar el periodo de operación

Adaptada de fuente propia (2014).



Fotografía 07
Muestra interior del medio filtrante: PVC corrugado cubierto por la biopelícula.
Adaptada de fuente propia (2014).



Fotografía 08
Muestra PVC corrugado recubierto por la biopelícula adherida a la superficie.
Adaptada de fuente propia (2014).