

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTORES:

Jiménez Barreto Damián Marcelo

C.I: 010527297-5

Montalván Cobos Paúl Marcelo

C.I: 010551547-2

DIRECTOR:

Ing. Andrés Omar Alvarado Martínez, PhD.

C.I: 010224647-7

CUENCA – ECUADOR

Mayo – 2018



RESUMEN

Actualmente uno de los mayores problemas relacionados con la contaminación ambiental es la falta de sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales. Muchas comunidades rurales no cuentan con un servicio de saneamiento adecuado, y en algunos casos las aguas servidas son vertidas al cuerpo receptor sin algún tratamiento previo; esto provoca un gran deterioro en acequias, lagos, aguas subterráneas y ríos. Ante este problema se planteó la creación de un sistema descentralizado de tratamiento de aguas residuales. El modelo elegido fue un fotobioreactor tubular cerrado para el desarrollo de microalgas y tratamiento de aguas residuales. El fotobioreactor consta de cuatro partes: el receptor solar, sistema de impulsión, sistema de aireación y un tanque de reserva. El diseño del fotobioreactor permite dos tipos de funcionamiento: modo discontinuo (recirculación del flujo) y modo continuo. Una vez construido el fotobioreactor fue llevado a las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba para realizar las pruebas de su funcionamiento. En primera instancia se determinó el desarrollo de la biomasa dentro del fotobioreactor para obtener un inóculo útil en el posterior proceso de tratamiento. Finalmente se analizó la eficiencia del fotobioreactor en el tratamiento de las aguas residuales verificando la variación de las variables de control (DBO, pH, coliformes totales y coliformes termotolerantes), obteniendo resultados prometedores debido a que a los cinco días de tratamiento los parámetros estudiados cumplen con la norma “Calidad ambiental y descarga de efluentes en cuerpos de agua dulce”.

Palabras clave: microalgas, fotobioreactor, tratamiento, DBO, coliformes, SSV, SST, saneamiento, aguas residuales.



ABSTRACT

Nowadays, one of the biggest problems related to environmental pollution is the lack of integral wastewater treatment systems. Many rural communities do not have an adequate sanitation service, and in some cases the wastewater is discharged directly to the receiving body without any prior treatment; this causes a great deterioration in ditches, lakes, groundwater and rivers. In view of this problem, the creation of a decentralized wastewater treatment system was considered. The chosen model was a closed tubular photobioreactor for microalgae cultivation and wastewater treatment. The photobioreactor has four parts: the solar receiver, drive system, aeration system and a reserve tank. The photobioreactor design allows two types of operation: discontinuous mode (flow recirculation) and continuous mode. Once the photobioreactor was built, it was taken to the facilities of the "Ucubamba" wastewater treatment plant to perform the tests of its operation. In the first instance, the development of the biomass within the photobioreactor was determined to obtain an inoculum to be used in the subsequent treatment process. Finally, the efficiency of the photobioreactor in the treatment of wastewater was analyzed by verifying the variation of the control variables (BOD, pH, total coliforms and thermotolerant coliforms). The tests showed promising results because after five days of treatment the parameters studied comply with the Ecuadorian norm "Calidad ambiental y descarga de efluentes en cuerpos de agua dulce".

Key words microalgae, fotobioreactor, treatment, DBO, coliforms, Suspended Volatile solids, Suspended total solids, sanitation, wastewater.



ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	10
ÍNDICE DE ECUACIONES	11
NOMENCLATURA Y LISTADO DE SÍMBOLOS	17
AGRADECIMIENTOS	21
DEDICATORIA	22
1 INTRODUCCIÓN	23
1.1 ANTECEDENTES Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	24
1.3 OBJETIVO GENERAL	24
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2 MARCO TEÓRICO	26
2.1 SANEAMIENTO AMBIENTAL, SITUACIÓN EN EL MUNDO Y EN EL ECUADOR	26
2.1.1 Sistemas Descentralizados de Tratamiento de Aguas Residuales	26
2.1.2 Sistemas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas	28
2.2 USO DE LAS MICROALGAS EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	29
2.2.1 Microalgas presentes en sistemas lagunares	32
2.2.2 Aspectos Fisiológicos de las microalgas	34
2.2.2.1 Fotosíntesis	36
2.2.2.2 Foto-período	36
2.2.3 Cultivo de microalgas	37
2.2.3.1 Foto-inhibición por oxígeno	39
2.2.3.2 Cultivos de alta densidad celular	40
2.3 FOTOBIORREACTORES	40
2.3.1 Diseño	41
2.3.1.1 Factores de diseño	41
2.3.2 Construcción	47
2.3.1.2 Materiales para la construcción de fotobiorreactores cerrados	47
2.3.1.3 Polietileno de Baja Densidad (PEBD)	48



2.4	BENEFICIOS DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES (DESINFECCIÓN)	49
2.5	APLICACIONES DE LOS FOTOBIORREACTORES PARA LA OBTENCIÓN DE BIOMASA	51
2.5.1	Métodos de Cuantificación de Biomasa	52
2.5.2	Métodos de Cosecha de Biomasa	54
3	MATERIALES Y MÉTODOS	55
3.1	UBICACIÓN Y CONDICIONES AMBIENTALES	55
3.2	MATERIALES	56
3.2.1	Materiales disponibles	56
3.2.2	Sistema de impulsión hidráulico	57
3.2.3	Sistema de aireación	58
3.3	REGISTROS DE DATOS	59
3.3.1	Análisis de Laboratorio de Aguas Residuales en la PTAR Ucubamba – Registro Histórico	59
3.4	CONSIDERACIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR	61
3.4.1	Tipo de fotobiorreactor	62
3.4.2	Longitud máxima	62
3.4.3	Facilidad constructiva	63
3.4.4	Área de exposición al sol	63
3.4.5	Geometría del fotobiorreactor	63
3.4.6	Estructura de soporte	65
3.4.7	Mezclado	65
3.4.8	Hidráulica del fotobiorreactor	66
3.4.9	Sistema de impulsión	66
3.5	CONSTRUCCIÓN DEL FOTOBIORREACTOR PILOTO	67
3.6	OPERACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR PILOTO	67
3.6.1	Inóculo inicial para la obtención de biomasa	67
3.7	ANÁLISIS DE LABORATORIO	69
4	RESULTADOS	70
4.1	PARÁMETROS DE DISEÑO	70
4.1.1	Velocidad mínima	70
4.1.2	Velocidad máxima	70
4.1.3	Longitud máxima	71
4.2	CONFIGURACIÓN DEL RECEPTOR SOLAR DEL FOTOBIORREACTOR PILOTO	72
4.2.1	Comportamiento hidráulico del fotobiorreactor	73



4.2.2	Modos de Operación	77
4.2.2.1	Operación Continua	77
4.2.2.2	Operación en estado discontinuo o “Tipo Batch”	78
4.3	FOTOBIORREACTOR PILOTO	79
4.3.1	Condiciones de operación del fotobiorreactor	79
4.3.2	Análisis del crecimiento de la biomasa en el fotobiorreactor	81
4.3.3	Análisis del efluente del fotobiorreactor	84
4.3.3.1	Resultados obtenidos del primer período de pruebas	85
4.3.3.2	Resultados obtenidos del segundo período de pruebas	87
4.3.3.3	Resultados obtenidos del tercer período de pruebas	88
4.3.3.4	Resultados obtenidos el cuarto período de pruebas	90
4.3.3.5	Análisis general de resultados	93
4.3.4	Viabilidad tecnológica y operacional de fotobiorreactores	94
4.3.4.1	Aplicación en sistemas familiares y condominiales	95
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
6	REFERENCIAS	102
7	ANEXOS	109



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Principales aplicaciones de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales	30
Tabla 2-2: Especies de microalgas presentes en sistemas lagunares de aguas residuales	33
Tabla 2-3: Fases de crecimiento y desarrollo de las microalgas	34
Tabla 2-4: Lista de coeficientes utilizados para el cálculo de pérdidas por accesorios..	47
Tabla 2-5: Propiedades del Polietileno de Baja Densidad.....	49
Tabla 2-6: Métodos de cuantificación de biomasa	52
Tabla 3-1: Materiales disponibles para la construcción del fotobiorreactor	56
Tabla 3-2: Equipos disponibles para el sistema de impulsión hidráulico.....	57
Tabla 3-3: Tuberías disponibles para la bomba peristáltica	58
Tabla 3-4: Tuberías disponibles para la bomba centrífuga.....	58
Tabla 3-5: Comparativa entre la concentración Media (10 años) en el Afluente de Agua Residual de la PTAR Ucubamba y la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes	60
Tabla 4-1: Valores considerados para el cálculo de la velocidad máxima y mínima.....	70
Tabla 4-2: Valores utilizados para el cálculo de la velocidad máxima	70
Tabla 4-3: Parámetros de cálculo para determinación de la longitud máxima.....	71
Tabla 4-4: Longitud máxima del fotobiorreactor en función de la velocidad	71
Tabla 4-5: Cálculo de presión en distintos puntos del receptor solar, $Q=0.5$ l/min	74
Tabla 4-6: Cálculo de LAM en distintos puntos del receptor solar, $Q=0.5$ l/min	75
Tabla 4-7: Cálculo de pérdidas y presión hidráulica en distintos puntos del receptor solar, $Q=30$ l/min.....	75
Tabla 4-8: Cálculo de LAM en distintos puntos del receptor solar, $Q= 30$ l/min	76
Tabla 4-9: Caracterización de la mezcla de Agua residual cruda y tratada.....	82
Tabla 4-10: Características iniciales y valor ponderado de SST y SSV – Día 27/11/2017	83
Tabla 4-11: Datos tabulados de los análisis de laboratorio del efluente del fotobiorreactor	85
Tabla 4-12: Especificaciones del primer período de pruebas	85
Tabla 4-13: Especificaciones del segundo período de pruebas	87



Tabla 4-14: Especificaciones del tercer período de pruebas	88
Tabla 4-15: Especificaciones del cuarto período de pruebas	90
Tabla 4-16: Número de personas a servir en función del tiempo de retención	95
Tabla 4-17: Tiempo de retención para una familia de 4 personas	95
Tabla 4-18. Consumo energético de los equipos utilizados	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Sistemas de tratamiento descentralizados. a) Tratamiento preliminar, b) Pozo séptico, c) Humedal artificial, d) Filtro anaerobio de flujo vertical, e) Filtro anaerobio de flujo horizontal, f) Manto de lodo anaerobio de flujo ascendente	28
Figura 2-2: Esquema de un sistema sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas	29
Figura 2-3: Fases de crecimiento y desarrollo de las microalgas	35
Figura 2-4: Ciclos de luz y oscuridad en la zona fotosintética	37
Figura 2-5: Concentración de CO ₂ y luminancia durante el anabolismo.....	38
Figura 2-6: Hidráulica del fotobiorreactor.....	46
Figura 2-7: Tipos básicos de fotobiorreactores. a: Tipo carrusel. b: tipo plano. c: Con iluminación interna. d: Tipo serpentin. e: Tipo tubular horizontal.....	48
Figura 3-1: Ubicación de la PTAR Ucubamba.....	56
Figura 3-2: Equipos disponibles para el sistema de impulsión hidráulico	57
Figura 3-3: Compresor de aire disponible	59
Figura 3-4: Reactor helicoidal propuesto por Morita et al. (2000).....	64
Figura 3-5: Reactor con sistema airlift propuesto por Sobczuk, Camacho, Rubio, Fernandez, & Grima, (2000).....	66
Figura 4-1: Vista esquemática del receptor solar del fotobiorreactor diseñado	72
Figura 4-2: Esquema del fotobiorreactor propuesto	73
Figura 4-3: Puntos de análisis de la línea de energía hidráulica.....	74
Figura 4-4: Configuración del fotobiorreactor para operación en modo continuo.....	77
Figura 4-5: Configuración del fotobiorreactor para operación tipo Batch	78
Figura 4-6: Crecimiento de la biomasa en el fotobiorreactor, desde 27/11/2017 al 04/12/2017	83
Figura 4-7: Resultados del primer período de pruebas.....	86
Figura 4-8: Resultados del segundo período de pruebas	87
Figura 4-9: Resultados del tercer período de pruebas	89
Figura 4-10: Resultados del cuarto período de pruebas	91



ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3-1: Abono Agrario NPK.....	68
Fotografía 3-2: Agua residual tratada de las lagunas de maduración de la PTAR Ucubamba.....	68
Fotografía 4-1: Construcción y traslado del fotobiorreactor piloto.....	79
Fotografía 4-2: Compresor de Aire y Bomba Peristáltica	80
Fotografía 4-3: Inspección visual del desarrollo de la biomasa en el fotobiorreactor....	84
Fotografía 4-4: Película de biomasa pegada a las paredes de las tuberías del receptor solar	90
Fotografía 4-5: Efectos de sombreado en el receptor solar durante el cuarto período de pruebas y obstrucción de la manguera de la bomba peristáltica.....	92



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	42
Ecuación 2	42
Ecuación 3	43
Ecuación 4	43
Ecuación 5	43
Ecuación 6	45
Ecuación 7	46
Ecuación 8	46
Ecuación 9	46
Ecuación 10	47



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Registro Histórico de Caracterización del Agua Residual en el Afluente de la PTAR Ucubamba entre los años 2000 y 2010.....	110
Anexo 2: Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes en Cuerpos de Agua Dulce.....	111
Anexo 3: Criterios de calidad admisible para aguas de uso agrícola de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Libro VI, Anexo I. ..	112
Anexo 4: Parámetros de los niveles guía de la calidad del agua para riego de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Libro VI, Anexo I.	113
Anexo 5: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 27/11/2017	114
Anexo 6: Resultados de los análisis de Laboratorio para determinación de crecimiento de la biomasa en el período de pruebas desde el día 27/11/2017 al día 04/12/2017	117
Anexo 7: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 04/12/2017	122
Anexo 8: Resultados de los análisis de Laboratorio para el primer período de pruebas – Desde el 04/12/2017 al 06/12/2017	123
Anexo 9: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 06/12/2017	125
Anexo 10: Resultados de los análisis de Laboratorio para el segundo período de pruebas – Desde el 06/12/2017 al 08/12/2017	128
Anexo 11: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 10/01/2018.....	130
Anexo 12: Resultados de los análisis de Laboratorio del tercer período de pruebas – Desde el 10/01/2018 al 17/01/2018	131
Anexo 13: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 17/01/2018.....	134
Anexo 14: Resultados de los análisis de Laboratorio del cuarto período de pruebas – Desde el 17/01/2018 al 24/01/2018	135
Anexo 15: Materiales y Construcción del Receptor Solar	138
Anexo 16: Registro fotográfico del tercer período de pruebas.....	139
Anexo 17: Visita de los estudiantes de la Universidad de Texas A&M.....	140



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Damián Marcelo Jiménez Barreto en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Mayo de 2018

Damián Marcelo Jiménez Barreto
C.I. 010527297-5



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Paúl Marcelo Montalván Cobos en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Mayo de 2018

Paúl Marcelo Montalván Cobos

C.I. 010551547-2



Cláusula de Propiedad Intelectual

Damián Marcelo Jiménez Barreto, autor del trabajo de titulación "**Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Mayo de 2018

Damián Marcelo Jiménez Barreto

C.I. 010527297-5



Cláusula de Propiedad Intelectual

Paúl Marcelo Montalván Cobos, autor del trabajo de titulación "**Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Mayo de 2018

Paúl Marcelo Montalván Cobos

C.I. 010551547-2



NOMENCLATURA Y LISTADO DE SÍMBOLOS

#: Número.

\$: Dólar.

%: Porcentaje.

[O₂]*entrada*: Concentración de oxígeno disuelto en la entrada.

[O₂]*salida*: Concentración de oxígeno disuelto a la salida.

°C: Grados centígrados.

ADC: Alta densidad celular.

ATP: Adenosín Trifosfato.

CH₄: Metano.

CO₂/m³h: Dióxido de carbono por metro cúbico por hora.

CO₂: Dióxido de carbono.

DBO: Demanda biológica de oxígeno.

DQO: Demanda química de oxígeno.

g/cm³: Gramo por centímetro cúbico.

g/l: Gramo por unidad de litro.

Gpa: Giga Pascal.

H₂O₂: Peróxido de hidrógeno.

hf: Pérdidas locales por accesorios.

hf: Pérdidas por fricción.

J/kgK: Joule por kilogramo por Kelvin.

kg/m³: Kilogramo por metro cúbico.

kg/m³s: Kilogramo por metro cúbico por segundo.

kg/ms: Kilogramo por metro por segundo.



kg: Kilogramo.

k_L : Coeficiente de pérdidas locales por accesorios.

kW: Kilowatt.

kWh: Kilowatt hora.

l: Litro.

l/hab/día: Litro por habitante por día.

l/hab: Litro por habitante.

l/min: Litro por minuto.

L/O: Luz – oscuridad.

l/s: Litro por segundo.

LAM: Línea de altura motriz.

L_T : Longitud de un tramo de tubería.

LDPE: *Low Density Polyethylene*.

mca: Metro de columna de agua.

m/s: Metro por segundo.

m: Metro.

máx: Máximo.

mg/l: Miligramo por litro.

MJ/m²/día: Mega Joule por metro cuadrado por día.

ml/min: Mililitro por minuto.

mm: Milímetro.

Mpa: Mega Pascal.

NADPH₂: Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato.

NMP/100ml: Número más probable por cada cien mililitros.



NPK: Nitrógeno – Fósforo – Potasio.

O₂: Oxígeno.

Pa: Pascal.

P_A : Presión en el punto A.

P_B : Presión en el punto B.

PEBD: Polietileno de Baja Densidad.

pH: Potencial de Hidrogeniones.

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

PVC: Policloruro de vinilo.

Q: Caudal.

Re: Número de Reynolds.

R_{O_2} : Tasa de generación volumetrica de oxígeno.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles.

UADC: Ultra alta densidad celular.

V: Velocidad del flujo.

V_A : Velocidad del fluido en el punto A.

V_B : Velocidad del fluido en el punto B.

V_{max} : Velocidad máxima admisible.

W/mK: Watt por metro por Kelvin.

W: Energía añadida al sistema.

W: Watt.

z_A : Altura de flujo en el punto A.

z_B : Altura de flujo en el punto B.

γ : Peso específico del fluido.

ϕ_i : Diámetro interior de la tubería.



Δ : Longitud del micro remolino.

$\mu\text{g/l}$: Microgramo por litro.

μm : Micrómetro.

ΣH_f : Disipación total de energía.

f : Factor de fricción.

k : Rugosidad del conducto.

q : Energía consumida en el sistema.

μ : Viscosidad dinámica del fluido.

ρ : Densidad del fluido.

ϵ : Disipación de energía.



AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer de manera especial al Ing. Andrés Alvarado Martínez por su confianza en nosotros para desarrollar este trabajo de titulación, por su apoyo, disponibilidad, paciencia y guía en todas las etapas y sobre todo por su gestión para la obtención de los recursos necesarios para el desarrollo y culminación de este proyecto.

También queremos agradecer a todo el personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba y a ETAPA E.P. por las facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto. Queremos agradecer en especial al Ing. Luis Felipe Díaz, por el espacio brindado dentro de las instalaciones de la PTAR Ucubamba y por su gestión para efectuar los análisis de laboratorio requeridos para la culminación de este trabajo.

A la Dra. Guillermina Pauta y al personal del laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería por las facilidades brindadas con los materiales y equipos utilizados en este proyecto.

Al Ing. Juan Fernando Cisneros y al Ing. Felipe Cisneros por el interés mostrado en el desarrollo de nuestro proyecto de titulación, por sus comentarios y sugerencias que han sido un aporte muy importante para la culminación de este trabajo.

A nuestros amigos de Texas, Chet, Omar y Joseph quienes aportaron con sus conocimientos, recomendaciones y experiencia al inicio de este proyecto.

Al Sr. Mario Peña, que nos apoyó con sus sugerencias y experiencia en el proceso constructivo y de transporte del fotobiorreactor a las instalaciones de la PTAR Ucubamba.

A la Universidad de Cuenca que durante todos estos años de formación universitaria nos ha brindado la oportunidad de desarrollarnos tanto en el ámbito profesional como en el personal.



DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto de titulación a toda mi familia, porque siempre han creído en mí y me han apoyado en los momentos más complicados en todas las etapas de mi vida, especialmente a mis padres, Marcelo y Marisol, a mi Hermana Paola y a mi sobrina Adela, que han los seres más cercanos en mi vida y han cuidado de mí cuando más lo he necesitado, agradezco también a todos mis amigos por creer en mí, presionarme cuando lo he necesitado y apoyarme incondicionalmente durante estos años

Paúl

A mis padres y toda mi familia por ser el pilar fundamental en mi vida, por su condicional apoyo en los buenos y malos momentos, brindándome de sabios consejos; como no agradecer a todos mis amigos que han estado presente en este largo trayecto y a todos mis seres queridos que ya no se encuentran con nosotros.

Este trabajo ha sido posible gracias a todos ustedes.

Damián



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y Formulación del Problema

Uno de los problemas más influyentes en la contaminación ambiental y salud pública de una población es la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales. En Ecuador, alrededor del 25% de la población no tiene acceso a instalaciones sanitarias mejoradas. A nivel local, muchos de los asentamientos periurbanos de Cuenca no cuentan con una infraestructura para solventar este problema. Existen zonas donde las descargas se realizan directamente a los cuerpos de agua sin tratamiento previo y otras regiones en donde se han implementado sistemas de tratamiento cuya efectividad ha disminuido en los últimos años debido al rápido crecimiento poblacional (y por ende disminución de los tiempos de retención hidráulica y sobrecarga de los sistemas), a las limitaciones económicas, a la falta de organización para mantenimiento y operación de dichos sistemas y especialmente a la falta de un análisis de factibilidad de los sistemas estandarizados adoptados en otras regiones del planeta pero que resultan inapropiados en el medio local (Alvarado et al., 2017).

El tratamiento de aguas residuales basado en microalgas es una alternativa a los sistemas de tratamiento convencionales ya que tienen la capacidad de generar un efluente de calidad aceptable a un bajo costo ecológico y permiten la recuperación de recursos aprovechables en varios campos productivos para generar un rédito económico que permita sustentar el sistema (Pierong et al., 2016). Las microalgas son útiles en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, compuestos de azufre, algunos metales pesados, ciertos compuestos orgánicos tóxicos. Además, diversos estudios han demostrado que la producción de oxígeno fotosintético influye de manera significativa en la inactivación de algunos microorganismos patógenos (Abdel-Raouf et al., 2012).

Durante los últimos años, en la Universidad de Cuenca se han realizado investigaciones sobre la recuperación de energía y el uso de los subproductos generados por las microalgas (Cabrera & Pulla, 2014). En la ciudad de Ambato, zona de características similares a las de Cuenca, se ha investigado el potencial antimicrobiano de microalgas pertenecientes a la familia *Chlorella* (Barona, 2014). A nivel regional, existen varias investigaciones orientadas a la utilización de las microalgas como aporte al desarrollo energético y remediación ambiental, especialmente el trabajo realizado por la



corporación BIOTEC que ha presentado un catálogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador (Guamán-Burneo & Gonzáles, 2016), además de otros proyectos de investigación en conjunto con estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas del Ecuador.

1.2 Justificación del Problema

La contaminación en los cuerpos de agua aumenta cada año debido al crecimiento poblacional, expansión de las redes de agua potable y la falta de construcción de nuevos sistemas de tratamiento de aguas residuales o expansión de las existentes para compensar dicho crecimiento. Los sistemas biológicos convencionales de tratamiento de efluentes domésticos resultan muy costosos e ineficientes para comunidades pequeñas y medianas y por ello es necesaria la búsqueda de soluciones sostenibles con sistemas descentralizados que requieran menor cantidad de energía y permitan la recuperación de recursos utilizados en el sistema, en este caso en particular, el aprovechamiento de la biomasa obtenida del proceso de tratamiento para aplicaciones en diversos campos.

En la ciudad de Cuenca no se han realizado experiencias piloto en fotobiorreactores de microalgas. Dado que un sistema de este tipo es una alternativa altamente factible para el tratamiento de aguas residuales y obtención de biomasa en sistemas descentralizados, el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca trabajando en conjunto con la Universidad de Texas A&M, han puesto en marcha la creación de un modelo piloto del reactor para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos.

En primera instancia se plantea probar el funcionamiento del fotobiorreactor en las instalaciones de la Planta de Tratamiento Ucubamba, en donde se dispone del agua residual, el espacio y facilidades necesarias para el desarrollo del proyecto. Sin embargo, se espera que a futuro el fotobiorreactor pueda ser probado en alguna planta de tratamiento descentralizada ubicada en las zonas periurbanas de la ciudad de Cuenca.

1.3 Objetivo General

Diseñar, construir y operar un modelo piloto de un reactor de microalgas de alta tasa aplicado al tratamiento de aguas residuales.



1.4 Objetivos Específicos

- Diseñar un fotobiorreactor piloto apropiado para las condiciones ambientales locales, materiales disponibles y recomendaciones dadas por diversos investigadores.
- Construir el fotobiorreactor en base a los parámetros de diseño recomendados.
- Operar el fotobiorreactor con el agua residual de las lagunas de maduración de la Planta de Tratamiento de Ucubamba para obtener un inóculo de microalgas.
- Utilizar el inóculo obtenido anteriormente y operar el fotobiorreactor para desarrollar biomasa microalgar y aplicar un proceso de tratamiento al agua residual cruda.
- Analizar los parámetros de control establecidos para determinar el potencial del fotobiorreactor en el tratamiento de aguas residuales.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Saneamiento ambiental, situación en el Mundo y en el Ecuador

Los sistemas de tratamiento de agua residual se desarrollan como respuesta a su incidencia en la salud pública y a las condiciones adversas causadas por vertidos de las aguas residuales al cuerpo receptor. El principal propósito del tratamiento de aguas residuales es acelerar la descontaminación natural mediante condiciones controladas en instalaciones de menor tamaño (Metcalf & Eddy, 1985).

En la actualidad, el rápido crecimiento poblacional en las áreas urbanas y rurales provoca que los sistemas de saneamiento sean sobrecargados y no puedan servir a toda la población. Esto conlleva a la utilización de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales distribuidos en las zonas aledañas al centro urbano para disminuir la carga sobre los sistemas de saneamiento principales (Huerga Pérez, 2005).

2.1.1 Sistemas Descentralizados de Tratamiento de Aguas Residuales

Los sistemas descentralizados permiten tratar las aguas residuales cerca de su fuente de origen ya sea en zonas rurales o comunidades pequeñas localizadas en la periferia de centros urbanos. Estas alternativas garantizan una considerable reducción de costos de construcción, operación, mantenimiento y consumos de energía, siendo una de las principales ventajas para el tratamiento de aguas residuales comparadas con los sistemas convencionales. Los sistemas descentralizados de tratamiento de agua residuales por lo general se utilizan en comunidades con una población menor de 2000 habitantes. Según Rodríguez (2009), los sistemas más utilizados en las plantas de tratamiento descentralizadas son: lagunas de sedimentación, pozos sépticos, lagunas anaerobias, filtros de lecho fijo, pozos sépticos con pantallas deflectoras, humedales o lagunas de pulimento de baja profundidad, entre otros.

En la ciudad de Cuenca se encuentran en funcionamiento 32 plantas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas operadas por la Empresa Pública de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, ETAPA EP que sirven a poblaciones de aproximadamente 200 personas. Estos sistemas constan principalmente de los siguientes procesos y/o unidades de tratamiento (Alvarado et al., 2017):



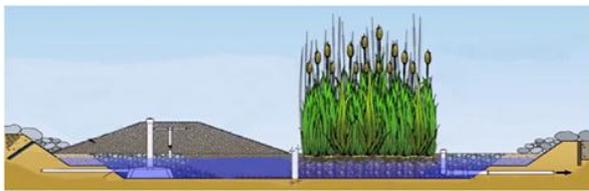
- Tratamiento preliminar, en el cual se controla desbordamientos en el sistema mediante estructuras de derivación, además se tiene la rejilla de admisión para impedir el paso de materiales (sólidos, basura, grava, entre otros), la principal función es acondicionar el agua a tratar para las siguientes unidades.
- Pozos sépticos, comúnmente constituidos de dos cámaras de 80 a 100 m³ de volumen, los tanques poseen sus respectivas tuberías de ventilación.
- Humedales artificiales, presentes en el 25% del tratamiento secundario de los sistemas descentralizados de Cuenca, el sistema consta de tuberías perforadas que permiten distribuir y recolectar el flujo de ingreso y salida.
- Filtros anaerobios de flujo vertical, comúnmente utilizados como tratamiento secundario del efluente de los pozos sépticos, están constituidos de cámaras circulares cubiertas con material granular. El afluente y efluente circulan por tuberías perforadas.
- Filtros anaerobios de flujo horizontal, utilizados como tratamiento secundario, económico y de fácil construcción. Este sistema se construye en una sola cámara cerrada con una pared divisoria. El material utilizado para llenar el reactor es grava, aproximadamente se llena el 50% de la profundidad del reactor.
- Manto de lodo anaerobio de flujo ascendente, utilizado para el tratamiento primario. El afluente ingresa al reactor en la parte inferior mediante una sola tubería y el efluente se recoge mediante una tubería perforada; sólo existe uno de estos dispositivos en las 32 plantas descentralizadas (Quillopungo).



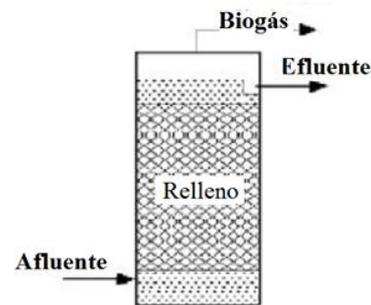
a



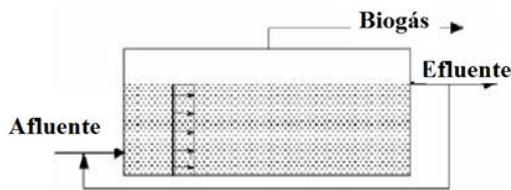
b



c



d



e



f

Figura 2-1: Sistemas de tratamiento descentralizados. a) Tratamiento preliminar, b) Pozo séptico, c) Humedal artificial, d) Filtro anaerobio de flujo vertical, e) Filtro anaerobio de flujo horizontal, f) Manto de lodo anaerobio de flujo ascendente

Fuente: (Parra Rodríguez & others, 2006)

2.1.2 Sistemas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Un sistema sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas se debe diseñar de manera que sea económico, de fácil construcción, seguro y amigable con el medio ambiente. Estos sistemas deben permitir la reutilización de los subproductos del tratamiento para generar un proceso cíclico que no produzca o minimice los residuos, además es de vital importancia considerar barreras de protección adecuadas para evitar la contaminación en el ambiente y en los cuerpos receptores (Valencia et al., 2010). Un sistema sostenible generalmente tiene la disposición mostrada en la Figura 2-2:

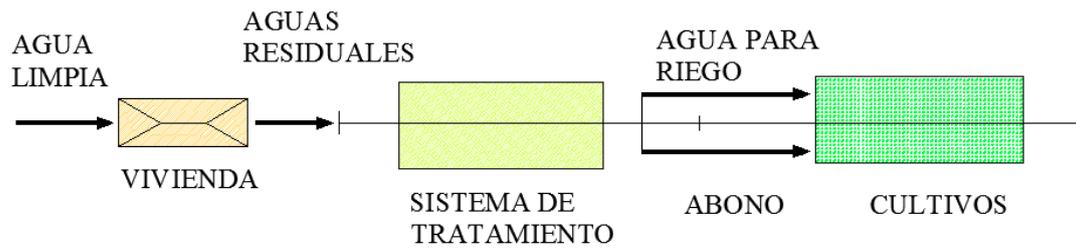


Figura 2-2: Esquema de un sistema sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Fuente (Valencia et al., 2010)

2.2 Uso de las microalgas en el tratamiento de las aguas residuales

Las microalgas tienen la capacidad de reducir considerablemente la cantidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo, entre otros), materia orgánica, sustancias tóxicas (orgánicas e inorgánicas) y acelerar la inactivación de bacterias patógenas (Chacón et al., 2004). Tienen la capacidad de aprovechar la luz solar, el dióxido de carbono (CO_2), y los nutrientes presentes en el agua residual para sintetizar su biomasa y producir oxígeno suficiente para que los organismos aerobios puedan metabolizar los residuos orgánicos (Hoffmann, 1998). Pueden ser utilizadas para tratar distintos tipos de aguas residuales (domésticas, industriales, agrarias, entre otras) y absorber los nutrientes presentes en las mismas, lo cual es una parte muy importante del tratamiento ya que un efluente rico en nutrientes descargado a un cuerpo de agua puede causar la eutrofización del mismo (Dalrymple et al., 2013).

Un tratamiento biológico basado en microalgas es una alternativa altamente factible debido al potencial para obtener efluentes de calidad aceptable a un bajo costo medioambiental y energético. La aplicación de las microalgas en los sistemas de tratamiento resuelve algunos de los inconvenientes de los sistemas de tratamiento convencional (uso de espacio, aireación, desechos tóxicos, entre otros) y permite una recuperación energética al cosechar la biomasa y procesarla para un aprovechamiento inteligente (Ometto et al., 2014)

Las microalgas aportan significativamente en el proceso de tratamiento de agua residual con las aplicaciones mostradas en la Tabla 2-1 (Muñoz & Guieysse, 2006):



Tabla 2-1: Principales aplicaciones de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales

Aplicación	Comentario
Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Se ha reportado que en tanques fotobiorreactores a escala de laboratorio o escala piloto para tratamiento de aguas residuales municipales o contaminadas artificialmente, las microalgas liberan una tasa de 1.5 a 1.92 kg de Oxígeno por kg de microalgas durante el crecimiento foto-autotrófico y tasas de oxigenación de 0.48 a 1.85 kg de Oxígeno por metro cúbico al día.
Remoción de Nutrientes	Las microalgas asimilan una cantidad significativa de nutrientes debido a que requieren grandes cantidades de nitrógeno y fósforo para la síntesis de proteínas (45-60% del peso seco de las microalgas), ácidos nucleicos y fosfolípidos. La remoción de nutrientes puede aumentar aún más mediante la separación del amoníaco o precipitación química del fósforo debido al aumento del pH asociado a la fotosíntesis.
Remoción de Metales Pesados	Los organismos fotosintéticos son capaces de acumular metales pesados mediante adsorción química, intercambio iónico y quimisorción. El proceso que comúnmente involucra al transporte de los metales al interior de la célula es generalmente un mecanismo de defensa para evitar el envenenamiento y acumular elementos esenciales. Las microalgas pueden liberar metabolitos extracelulares que producen agentes quelantes capaces de unirse a iones metálicos. Finalmente, el incremento del pH asociado al crecimiento de las microalgas puede mejorar la precipitación de metales pesados.
Remoción de Patógenos	Las microalgas mejoran la desactivación de patógenos al incrementar el valor del pH, temperatura y la concentración



de oxígeno disuelto en el efluente tratado.

Remoción de Contaminación Heterotrófica	Ciertos tipos de microalgas verdes y cianobacterias son capaces de utilizar compuestos recalcitrantes tóxicos como fuente de carbono, nitrógeno, sulfuros o fósforo.
Producción de Biogás	La producción de metano (CH ₄) a partir de la digestión anaerobia de la biomasa algal-bacterial puede generar un ahorro económico sustancial.
Monitoreo de Toxicidad	Las microalgas son usadas para pruebas de toxicidad o para estudios de ecología microbiana debido a que éstas son indicadores sensibles de cambios ecológicos.

Fuente: (Muñoz & Guieysse, 2006)

Las microalgas pueden ayudar a disminuir la energía requerida y mejorar la eficiencia en el proceso de remoción de la DBO del agua residual al proveer oxígeno (generado en la fotosíntesis) a las bacterias aerobias heterotróficas que participan en la descomposición de la materia orgánica. En los procesos tradicionales aerobios de tratamiento de aguas residuales, el requerimiento energético de la aireación mecánica resulta ser del 50% o más del total de la energía de todo el sistema (Tchobanoglous et al., 2003). Se ha demostrado que una degradación aerobia resulta mucho más sencilla que una anaerobia cuando se trata con compuestos recalcitrantes y tóxicos, además con éste método existe un menor riesgo de contaminación al que se tiene cuando se utilizan aireadores mecánicos (Brandt et al., 2000).

La aplicación de microalgas como método de tratamiento de aguas residuales es considerado por varios autores como un proceso terciario debido a la considerable remoción de iones orgánicos y nutrientes; sin embargo existen investigadores que lo clasifican como un proceso secundario de tratamiento por la gran disminución de DBO y reducción de materia orgánica, que al mismo tiempo produce una disminución de microorganismos patógenos (desinfección) al combinar los procesos fotosintéticos, la producción de oxígeno disuelto y la luz solar como fuente energética y desinfectante (Tam & Wong, 1989).



La ventaja principal de un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en microalgas es el uso del espacio. Al ser organismos acuáticos, las microalgas no requieren ser cultivadas en un terreno, por el contrario, ésta característica permite configurar un sistema que aprovecha mejor el espacio sin competir con otros usos de suelo, igual o más productivos. En el caso de los fotobiorreactores tubulares cerrados, la disposición de las tuberías, permite ampliar el sistema de forma vertical optimizando el uso del espacio en planta y al mismo tiempo la captación de la energía lumínica (Satpal & Khambete, 2016).

Sin embargo, el desafío al combinar un sistema de cultivo de microalgas con uno de tratamiento de aguas residuales, consiste en: una adecuada caracterización del agua residual, el tratamiento previo que tenga el agua residual antes de ingresar al fotobiorreactor y principalmente de las especies de microalgas aptas para desarrollarse en este tipo de sustratos (Salama et al., 2017).

2.2.1 Microalgas presentes en sistemas lagunares

En los sistemas de tratamiento lagunares se desarrollan una gran cantidad de microalgas y cianobacterias cuya concentración generalmente está por debajo de los 200 mg/l en términos de sólidos suspendidos volátiles y pueden presentarse en un rango de $1E+04$ a $1E+06$ células/ml de agua residual. Las especies que puedan surgir de los sistemas lagunares dependen de la cantidad de nutrientes y materia orgánica presente en el agua residual, sin embargo, un contenido muy alto de la misma podría disminuir la diversidad de especies desarrolladas (Alvarado, 2013).

Los principales tipos de algas encontradas en los sistemas lagunares son las algas verdes (*Chlorophytas*) y las algas pigmentadas (*Pigmented flagellated Euglenophyta*), además de las cianobacterias (*Cyanophyta* o alga verde azulada). Las microalgas les dan el color verde característico a las lagunas mientras que las cianobacterias presentan algunas características típicas de las microalgas y de bacterias, y proliferan en ambientes de poca disponibilidad de nutrientes. En la Tabla 2-2 se presenta una revisión de las especies que se encuentran comúnmente en las lagunas facultativas y de maduración presentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas lagunares (Shilton, 2005):



Tabla 2-2: Especies de microalgas presentes en sistemas lagunares de aguas residuales

Especie	Lagunas	
	Facultativas	Maduración
<i>Euglenophyta</i>		
<i>Euglena</i>	+	+
<i>Phacus</i>	+	+
<i>Chlorophyta</i>		
<i>Chlamydomonas</i>	+	+
<i>Chlorogonium</i>	+	+
<i>Eudorina</i>	+	+
<i>Pandorina</i>	+	+
<i>Ankistrsdesmus</i>	-	+
<i>Chlorella</i>	+	+
<i>Micractinium</i>	-	+
<i>Scenedesmus</i>	-	+
<i>Selastrum</i>	-	+
<i>Carteria</i>	+	+
<i>Coelastrum</i>	-	+
<i>Discosphaerium</i>	-	+
<i>Oocytis</i>	-	+
<i>Rhodomonas</i>	-	+
<i>Volvox</i>	+	-
<i>Chrysophyta</i>		
<i>Navicula</i>	+	+
<i>Cyclotella</i>	-	+
<i>Cianobacteria</i>		
<i>Oscillatoria</i>	+	+
<i>Arthrospira</i>	+	+
<i>Spirulina</i>	-	+

Nota 1: (+) se encuentra presente, (-) no se encuentra presente

Fuente: (Shilton, 2005)



2.2.2 Aspectos Fisiológicos de las microalgas

Las microalgas son organismos fotosintéticos que poseen un pigmento que les permite convertir energía lumínica del sol en energía química, destinada para su subsistencia. Las microalgas se definen como organismos unicelulares eucariotas y fotosintéticos. Son esenciales en la producción primaria de energía dentro de la cadena trófica además de ser la primera dentro de la cadena en ser formadora de materia orgánica. Generalmente poseen un tamaño dentro del rango de 5 y 50 μm , lo que las hace fácilmente digeribles por otros organismos. Se presentan de diferentes morfologías y poseen varios pigmentos que le dan colores variados, entre los más importantes están: clorofila a y clorofila b (color verdoso), clorofila c (algas pardas y diatomeas), clorofila d (algas rojas) y varios tipos de carotenoides (Barsanti & Gualtieri, 2014).

Las microalgas son organismos con una fisiología muy flexible, se adaptan fácilmente a las fluctuaciones ambientales y su cinética de crecimiento depende además de los factores anteriormente mencionados, de la densidad celular presente en el sustrato. La mayoría de especies de microalgas son fotosintéticas, sin embargo, existen algunas excepciones, como por ejemplo el 50% de la especie *Dinophyta*, que no se desarrolla mediante este proceso biológico. La mayoría de las microalgas generan oxígeno como desecho primario, pero existen unas pocas especies que forman ácido sulfúrico, mientras que los productos almacenados son en su mayoría lípidos y azúcares (Ojamäe, 2011).

El crecimiento y desarrollo de las microalgas puede dividirse en las cinco fases presentadas en la Tabla 2-3 y Figura 2-3:

Tabla 2-3: Fases de crecimiento y desarrollo de las microalgas

Fase	Duración (días)	Características
Latencia	1 – 3	Comienza la absorción de nutrientes por parte de las células, además comienza el proceso de adaptación al medio ambiente. En este estado las células no tienden a dividirse, debido a que no existen las condiciones apropiadas para el proceso.
Crecimiento	4	Se inicia cuando las microalgas ya se han adaptado al

Exponencial	ambiente, por lo que es posible su multiplicación. Durante la fase exponencial, la división celular es mucha más rápida que el resto de fases.
Estacionaria -	La población se vuelve constante, la duración es muy pequeña.
Declinación 1 – 2	En esta fase disminuye la división celular, ya que se tienen factores desfavorables en los cultivos, se agotan los nutrientes, se desajusta el pH, existe disminución de rayos solares.
Muerte -	Ante el aumento de bacterias, hongos y espumas en el cultivo las condiciones comienzan a hacerse desfavorables para el desarrollo de las microalgas, por lo que éstas empiezan a morir.

Fuente: (Peña & Quiroz, 2013)

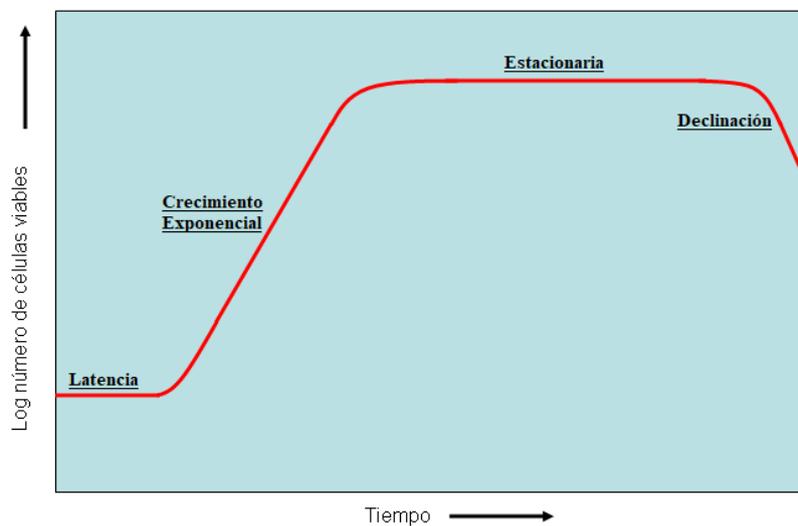


Figura 2-3: Fases de crecimiento y desarrollo de las microalgas

En las etapas de crecimiento y desarrollo se deben tener las condiciones más similares a las condiciones de crecimiento natural de las microalgas, para lo cual se deben controlar los siguientes parámetros (Candela, 2017):



- Iluminación: es fundamental para que se realice la fotosíntesis de las microalgas, se debe evitar que objetos externos impidan una correcta de iluminación.
- Temperatura: la reproducción celular es mucho mayor cuando se tienen temperaturas dentro del rango óptimo que se encuentra entre los 16 y 24°C.
- Aireación: permite que los nutrientes que se encuentran en el medio posean una mayor difusión, además ayuda a conservar la suspensión de las microalgas y suministra CO₂, que es fundamental para la fotosíntesis y estabilidad del pH.

2.2.2.1 Fotosíntesis

La fotosíntesis se refiere a un proceso fisicoquímico en el cual un organismo fotoautótrofo utiliza energía luminosa para sintetizar compuestos orgánicos. En el caso de las microalgas se produce una fotosíntesis oxigénica, es decir, que durante el proceso se produce una liberación de oxígeno molecular y una absorción de CO₂ para sintetizar compuestos orgánicos (Carril, 2011).

El proceso requiere de dos períodos de funcionamiento, el primero se refiere a las reacciones que se producen cuando los organismos reciben luz y el segundo, a las reacciones producidas en la oscuridad; a esto se le denomina foto-período. En las reacciones con la luz, la energía de la luz se transforma en energía química, produciendo Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato (NADPH₂) y Adenosín Trifosfato (ATP). En las reacciones en la oscuridad, los compuestos producidos en la etapa anterior son utilizados para la reducción del CO₂ en carbohidratos (Richmond, 2004). La energía luminosa aprovechable y la concentración de CO₂ en el medio son los principales factores limitantes en el cultivo de microalgas (Muñoz & Guieysse, 2006).

2.2.2.2 Foto-período

El foto-período es un factor fundamental en el desarrollo de las microalgas ya que permite la sincronización de la división celular (tiempo necesario para que se realice la fotosíntesis en la fase iluminada) y la consecuente respiración que se efectúa en la fase de oscuridad (Figura 2-4). Así se garantiza que el metabolismo se complete correctamente y se obtenga una productividad considerable en la obtención de biomasa. A pesar de ser un factor determinante en el cultivo de microalgas, el régimen de iluminación óptimo no se puede determinar cuantitativamente, por lo que se establecen parámetros que describen la energía luminosa intermitente aprovechable: la relación de

los períodos luz/oscuridad (L/O), la frecuencia de los ciclos L/O, la intensidad de la luz y su trayectoria (Contreras-Flores et al., 2003).

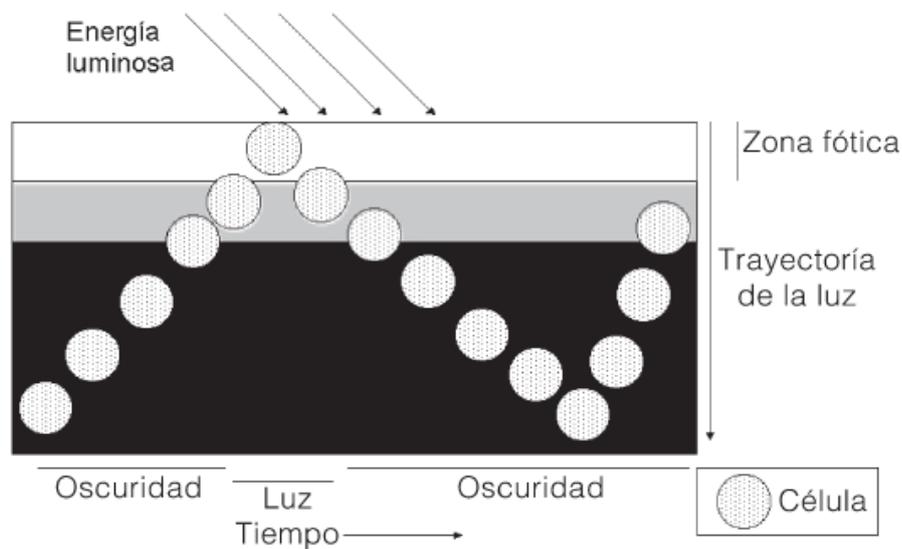


Figura 2-4: Ciclos de luz y oscuridad en la zona fotosintética

Fuente: (Contreras-Flores et al., 2003)

La trayectoria de la luz es la distancia que recorre un fotón a través del reactor hasta llegar a su destino. Su magnitud se expresa en diferentes medidas en los distintos tipos de reactores; en el caso de los reactores tubulares cerrados, se define según el diámetro del tubo. Un incremento en la trayectoria de la luz implica una reducción del volumen iluminado debido a la sombra generada por los organismos más superficiales, en consecuencia también se reduce la frecuencia con la que las microalgas son expuestas a la luz y la relación de los períodos L/O; por el contrario si la trayectoria de luz disminuye, se obtienen mayores períodos L/O y una mayor frecuencia de ciclos con lo que se aumenta la productividad del cultivo (Grobelaar, 1994).

2.2.3 Cultivo de microalgas

Las bacterias aerobias presentes en el agua residual, a más de ser una fuente de CO₂, estimulan la liberación de vitaminas, factores de crecimiento orgánicos y varían el pH del sustrato para permitir el crecimiento de las microalgas (Sekaran et al., 2013).

Se puede utilizar aguas residuales con alto DBO y DQO como sustrato ya que la materia orgánica presente en las mismas puede servir como fuente de nutrientes. Debido a la configuración de su ruta metabólica, las microalgas del tipo *Chlorella sp* y algunas otras especies, han sido utilizadas para experimentación en cultivos mixotróficos, es decir,



que los organismos utilizan su metabolismo autotrófico y heterotrófico para suplir sus requerimientos de energía y carbono; de esta manera se puede obtener energía de fuentes de origen orgánico, inorgánico y de la luz solar (Sandoval, 2013). Existe una especie denominada *Chlorella sorokiniana*, capaz de alcanzar altas densidades en su crecimiento ($110E+06$ células/ml) en cultivos donde se ha inducido el metabolismo mixotrófico y heterotrófico (Moronta et al., 2006).

La luz solar es otra fuente de energía natural, renovable y sostenible de la que toman ventaja las microalgas para efectuar los procesos fotosintéticos, que incrementan en relación directa con el aumento de la energía lumínica, hasta alcanzar la máxima tasa de crecimiento de las microalgas (Park et al., 2011). Si se supera la máxima tasa de crecimiento, la productividad del cultivo disminuye y puede producirse una foto-inhibición que afecte a las células hasta el punto de matarlas (Contreras-Flores et al., 2003).

A más de la energía luminosa requerida, está la concentración de CO_2 en el sustrato donde habitan las microalgas; si ésta es muy baja (menor a la concentración mínima requerida para el desarrollo del organismo) la cantidad de energía luminosa no tiene influencia sobre los procesos fotosintéticos tal como se observa en la Figura 2-5.

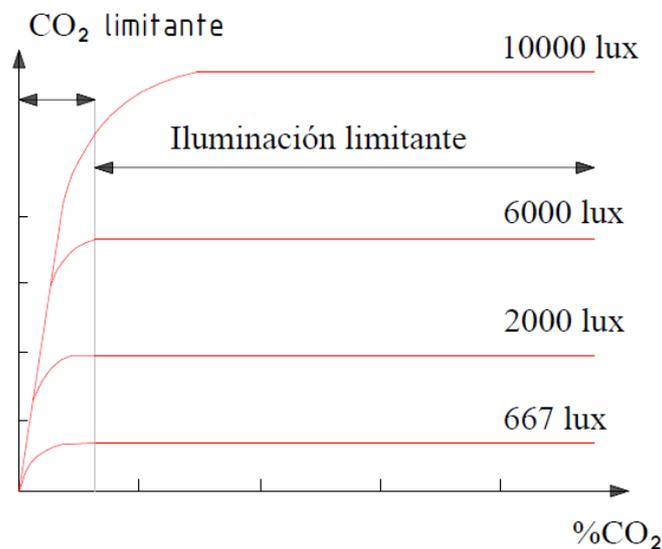


Figura 2-5: Concentración de CO_2 y luminancia durante el anabolismo

Fuente: (Porto, 2007)

La luz llega directamente a la superficie y el sustrato dentro del reactor está en constante movimiento, por lo que las microalgas están expuestas a la misma por períodos cortos



de tiempo que pueden durar desde milisegundos hasta unas cuantas décimas de segundo. Los organismos ubicados más cerca de la superficie obstruyen el paso de la luz hacia los organismos en el interior del reactor. Se ha reportado en estudios anteriores que la luz penetra entre 1 a 2 mm más allá de la superficie, por lo tanto, la zona aprovechable para el desarrollo de procesos fotosintéticos es aproximadamente 10 al 30% del volumen total del reactor (Lu & Vonshak, 1999). Esta configuración ha permitido que en estudios anteriores desarrollados en cultivos de microalgas de la especie *Spirulina* con densidades celulares ultra-altas (>3 g/l) se llegue a la conclusión de que la foto-inhibición no se produce totalmente bajo un régimen de intensidad lumínica muy alta, debido a la dilución de la luz debida a la sombra generada por los organismos más superficiales (Singh & Sharma, 2012).

2.2.3.1 Foto-inhibición por oxígeno

La foto-inhibición se produce normalmente por una concentración muy alta de oxígeno en el medio de cultivo. La actividad fotosintética se ve reducida debido a una reacción foto oxidativa de las clorofilas que bajo un exceso de radiación tiende a producir una recombinación de cargas que da a lugar la formación de clorofilas del tipo P680 que interactúan con el oxígeno disuelto en el sustrato y generan oxígeno molecular (O_2), que posee una alta capacidad oxidante que destruye membranas y proteínas importantes de los organismos; a este proceso se le denomina fotorespiración (Rubio et al., 1999). En reactores tubulares, este concepto cobra vital importancia a la hora de su escalamiento hacia sistemas industriales. El escalamiento mediante el aumento de la longitud del tubo provocaría una acumulación de oxígeno muy alta, causaría foto-inhibición y en casos extremos la muerte de las células por daño oxidativo. Este problema provocó que a raíz de los primeros experimentos realizados en los años 80 se piense que no se puede escalar un sistema tubular cerrado; por ello, se ha llegado a la conclusión de que añadir un sistema de remoción de oxígeno generado fotosintéticamente es fundamental en el diseño de un sistema de este tipo (Richmond, 2000).

En reactores tubulares cerrados, es común instalar estaciones de aireación tipo *airlift* para remover mediante desorción el oxígeno del medio de cultivo y combinarlo con un desgasificador para separar el aire enriquecido con oxígeno del sustrato. El tiempo entre las etapas de aireación dependerá de las características del cultivo tales como la velocidad de crecimiento, densidad celular, distancia entre etapas, entre otras (Richmond et al., 1993).



2.2.3.2 Cultivos de alta densidad celular

Una alternativa para evitar la fotoinhibición es aplicar un cultivo de Alta Densidad Celular (ADC) o Ultra Alta Densidad Celular (UADC). Un cultivo ADC implica mantener concentraciones celulares superiores a 3 g/l de biomasa en el sustrato, mientras que para uno del tipo UADC se debe mantener concentraciones de entre 15 y 80 g/l. En este tipo de cultivos la intensidad excesiva de luz ya no es un limitante, pero los efectos del auto-sombreado provocados por la gran concentración de microalgas se vuelven más severos (Qiang et al., 1996).

En los sistemas de cultivo ADC y UADC el factor determinante de la eficiencia fotosintética es el tipo de mezclado que se aplique. Se debe mantener además de una alta densidad celular, una trayectoria de luz pequeña y un mezclado vigoroso inducido por burbujas de aire. Cantidades de energía luminosa que son tóxicas para cultivos de baja densidad celular, resultan óptimas para los sistemas ADC y UADC; sin embargo, se ha detectado que en cultivos de ADC las microalgas secretan sustancias auto-inhedoras. Se han propuesto varias alternativas para la remoción de las sustancias inhibitorias en cultivos UADC tales como membranas de ultrafiltración añadidas al sustrato además de distintas configuraciones geométricas para los reactores combinados con sistemas de iluminación artificial y sistemas de remoción semicontinuos exteriores al reactor; en este tipo de cultivos la pérdida de peso celular es mucho menor que en sistemas más convencionales de cultivo. Según Qiang et al. (1996) en sistemas con ésta configuración la pérdida de peso es menor a la que se presenta en otros sistemas, pero se tiene también un menor contenido proteínico, por lo que la misma no resulta factible para cultivos proyectados para la obtención de biomasa de uso alimenticio.

2.3 Fotobiorreactores

Los fotobiorreactores que permiten la proliferación de microalgas generalmente se presentan en forma de lagunas y de reactores tubulares cerrados. Las lagunas tienen la ventaja de ser baratas y sencillas de construir, además su operación y mantenimiento son más fáciles que los requeridos en otros sistemas; sin embargo, no aprovechan eficientemente la luz solar, y al estar expuestos a la intemperie el control de temperatura y contaminación es complejo. Los reactores tubulares cerrados en cambio permiten una alta productividad al aprovechar de mejor manera los recursos del sustrato y energía lumínica, además las condiciones de cultivo son fácilmente controlables, pero también



presentan desventajas tales como su costo, complejidad, el constante daño celular por turbulencia, el deterioro de los materiales y equipamiento por corrosión biológica y la acumulación de oxígeno que puede llevar a la foto-inhibición (Loera-Quezada & Olguín, 2010). Los reactores tubulares cerrados generalmente se presentan con una disposición de tuberías transparentes de polietileno o vidrio; estos materiales son los más utilizados debido a la transparencia y a la resistencia al ataque de las aguas residuales. La disposición de los tubos puede tener distintas configuraciones (formas y tamaños): horizontales, verticales, piramidales, inclinados o variada según el diseño. Al conjunto de tubos se le conoce como receptor solar, y en él, además de circular el agua a tratar, es donde se captura la luz solar requerida para los procesos biológicos de las microalgas (Vásquez & Brenes, 2015).

Además del receptor solar se necesita de una estación de bombeo, un tanque de reserva y aireadores para poder garantizar la recirculación del flujo y la saturación de oxígeno para el reingreso del flujo al receptor solar. El receptor solar en conjunto con la estación de bombeo, el tanque de reserva y los aireadores forman el fotobiorreactor.

2.3.1 Diseño

2.3.1.1 Factores de diseño

Existen varios factores para el diseño de un fotobiorreactor, dentro de los más importantes se encuentran:

- Diámetro y longitud de los tubos
- Velocidad de flujo
- Longitud máxima
- pH
- Mezclado
- Hidráulica del fotobiorreactor

Los diámetros y la longitud de los tubos dependen principalmente de los materiales disponibles. Al ser materiales no comunes para la construcción no se tiene un gran catálogo en el mercado local; en cuanto al largo es preferible trabajar con tramos cortos para evitar la inhibición por el aumento de O_2 en el medio (Contreras Flores et al., 2003).



2.3.1.1.1 Velocidad de flujo

La velocidad de flujo en el fotobiorreactor debe ser lo suficientemente alta para garantizar un flujo turbulento con el fin de que las microalgas no se estanquen en el lado oscuro de la tubería por mucho tiempo. Sin embargo, la excesiva turbulencia puede dañar las células y esto plantea un límite en la velocidad de cultivo.

El diseño del fotobiorreactor debe garantizar que el número de Reynolds sea superior a 3000 para que el flujo sea turbulento.

Para el cálculo del número de Reynolds se utiliza la Ecuación 1:

$$Re = \frac{V\phi_i\rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds.

V: Velocidad del flujo (m/s).

ϕ_i : Diámetro interior de la tubería (m).

ρ : Densidad del fluido (kg/m³).

μ : Viscosidad dinámica del fluido (kg/ms).

2.3.1.1.2 Longitud máxima

La longitud máxima del fotobiorreactor está limitada por varios factores, los cuales son el límite aceptable en la concentración de oxígeno disuelto, la velocidad del flujo en la tubería y la tasa de fotosíntesis. La longitud máxima del fotobiorreactor se puede calcular con la Ecuación 2 (Sobczuk et al., 2000):

$$L = \frac{V_{max}([O_2]_{entrada} - [O_2]_{salida})}{R_{O_2}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

V_{max} : Velocidad máxima admisible por el cultivo, establecida por el daño celular o por consideraciones físicas (m/s).

R_{O_2} : Tasa de generación volumétrica de oxígeno por la fotosíntesis en el tubo (kg/m³s).



[O₂]_{entrada}: Concentración de oxígeno disuelto en la entrada del fotobiorreactor, generalmente es el valor de saturación del fluido cuando está en equilibrio con la atmósfera (mg/l).

[O₂]_{salida}: Concentración de oxígeno disuelto máxima admisible que no permita la inhibición por fotosíntesis (mg/l).

La velocidad máxima en el interior de los tubos debe ser tal que las dimensiones de los micro-remolinos creados en el interior no se aproximen a las dimensiones celulares. La longitud aproximada de los micro remolinos se puede calcular mediante la teoría de turbulencia isotrópica local de Kolmogoroff, para lo cual se utiliza la **Ecuación 3** (Vásquez & Brenes, 2015):

$$\Lambda = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{\frac{3}{4}} \epsilon^{\frac{-1}{4}} \right] 10^6 \tag{Ecuación 3}$$

Donde:

Λ : Longitud del micro remolino (μm).

ϵ : Disipación de energía por unidad de masa.

La tasa de disipación de energía en el tubo depende de la caída de presión determinada con la Ecuación 4:

$$\epsilon = \frac{2fV_{max}^3}{\phi_i} \tag{Ecuación 4}$$

Donde:

f : Factor de fricción.

El factor de fricción se puede calcular utilizando la ecuación de Colebrook (**Ecuación 5**):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 \ln \left(\frac{k/\phi_i}{3.7} + \frac{2.523}{Re\sqrt{f}} \right) \tag{Ecuación 5}$$

Donde:

k : rugosidad del conducto.



2.3.1.1.3 pH del medio de cultivo

En los fotobiorreactores el pH del fluido puede variar significativamente al final del recorrido del fotobiorreactor. La concentración de pH se eleva al disminuir la concentración de CO₂. Esto ocurre debido al crecimiento de las microalgas, lo cual aumenta la demanda de consumo de CO₂, y se puede controlar con la inyección de CO₂ en el fotobiorreactor.

2.3.1.1.4 Mezclado

Un eficiente mezclado favorecerá significativamente al intercambio gaseoso ya que evita la sedimentación de las microalgas y la concentración de nutrientes. Su principal función es permitir que todas las microalgas puedan acceder a las zonas iluminadas del receptor solar. Un dispositivo que inyecte aire comprimido al fluido funciona adecuadamente como dispositivo de mezclado. En investigaciones anteriores se han utilizado sistemas *airlift* y compresores de aire adaptados con dispositivos difusores (Ogbonna & Tanaka, 2000).

La frecuencia y el tiempo que las microalgas permanecen en zonas iluminadas está en función de la trayectoria de la luz solar y además del mezclado. En cultivos de alta densidad celular es necesario utilizar altos niveles de iluminación. Estudios realizados por Richmond (2000) indican que con una iluminación intensa como la que ocurre al mediodía y un correcto mezclado se aumentará la productividad de las microalgas. Esto conlleva a un aumento de la tasa de crecimiento de las microalgas y por ende una mayor eficiencia del tratamiento de las aguas residuales.

2.3.1.1.5 Hidráulica del fotobiorreactor

Dado que el fotobiorreactor tiene un flujo tipo pistón se rige por las ecuaciones básicas de la dinámica de fluidos, con un enfoque Euleriano (se fija la atención en un punto en el espacio) sin dejar de tomar en cuenta un enfoque Lagrangiano (atención a partículas en el fluido) al momento que se analiza el mezclado de las células en el fotobiorreactor para que no se produzca la muerte de las mismas. Para la dinámica de fluidos se utilizó el principio de Bernoulli que describe el comportamiento de un líquido en movimiento a lo largo de una corriente de agua. Cada término perteneciente a la ecuación de Bernoulli es un tipo de energía que está presente en el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve en el sistema (Mott, 2006).



Se da un principal enfoque a la ecuación de energía debido que se debe conocer la presión actuante en diferentes puntos del fotobiorreactor para garantizar que no exista daño celular y sobre todo que el fluido circule completamente por el fotobiorreactor. La ecuación de Bernoulli (Ecuación 6) se aplica a fluidos no viscosos, incomprensibles donde no existe aportes por trabajos externos, sin embargo, a partir de la conservación de la cantidad de movimiento para fluidos se puede obtener una ecuación general donde se toma en cuenta a adición o consumo de energía y la fricción:

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + W = z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \sum Hf + q \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

z_A : Altura de flujo en el punto A (m).

P_A : Presión en el punto A (Pa).

γ : Peso específico del fluido (kg/m^3).

V_A : Velocidad del fluido en el punto A (m/s).

W: Energía añadida al sistema.

z_B : Altura de flujo en el punto B (m).

P_B : Presión en el punto B (Pa).

V_B : Velocidad del fluido en el punto B (m/s).

q: Energía consumida en el sistema.

ΣHf : Disipación total de energía debido a la fricción y pérdidas locales los accesorios (m).

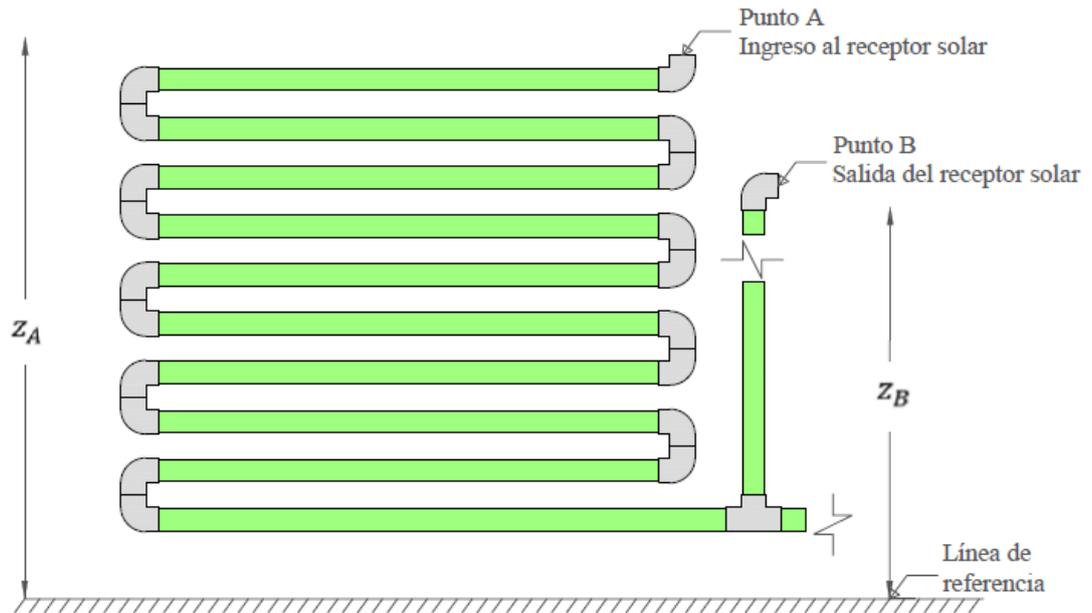


Figura 2-6: Hidráulica del fotobiorreactor

La disipación total de energía está definida por:

$$\sum Hf = hf + hl \tag{Ecuación 7}$$

Donde:

hf : Pérdidas por fricción (m).

hl : Pérdidas locales por accesorios (m).

Para el cálculo de las pérdidas por fricción se utilizó la Ecuación 8:

$$hf = f \frac{L_T v^2}{\phi_i 2g} \tag{Ecuación 8}$$

Donde:

L_T : Longitud del tramo de tubería (m)

Para el cálculo de las pérdidas locales por los accesorios se utilizó la Ecuación 9:

$$hl = \sum k_L \frac{v^2}{2g} \tag{Ecuación 9}$$

Donde:



k_L : Coeficiente de pérdidas locales por accesorio, los coeficientes utilizados se especifican en la Tabla 2-4:

Tabla 2-4: Lista de coeficientes utilizados para el cálculo de pérdidas por accesorios

Accesorio	Coeficiente de perdidas locales k_L
Codo 90°	30 <i>f</i>
Tee de paso directo	20 <i>f</i>
Tee de paso por el ramal	60 <i>f</i>
Válvula de paso	340 <i>f</i>
Unión	0.12

Fuente: (Mott, 2006)

Cualquier punto de análisis consta de tres componentes de energía:

- Cinética ($v/2g$): energía debida a la velocidad que circula el fluido.
- Potencial (z): también llamada gravitacional, debida a la altura que posee el fluido con respecto a un eje de referencia.
- Energía de presión (P/γ): debida a la presión a la que se encuentra sometido.

Además, resulta conveniente graficar la línea de altura motriz (LAM) que está definida como la suma de la energía por potencial y la energía de presión, para de esta manera lograr apreciar la variación de la energía en los diferentes puntos del receptor solar; la LAM en un punto i está definida por la Ecuación 10:

$$LAM = z_i + \frac{P_i}{\gamma} \tag{Ecuación 10}$$

2.3.2 Construcción

2.3.1.2 Materiales para la construcción de fotobiorreactores cerrados

Un fotobiorreactor debe proveer condiciones adecuadas para el desarrollo de un cultivo de microalgas, primero a escala piloto y luego a mayores escalas. Los materiales empleados en la construcción de estos sistemas dependen del tipo de cultivo a desarrollar; por ejemplo, en reactores cerrados se debe escoger un material que permita reducir los riesgos de contaminación y efectuar un control efectivo de los cultivos, especialmente en la iluminación, temperatura, administración del dióxido de carbono,

además se debe garantizar que el material no afecte la composición química del sustrato en donde se desarrollará el cultivo (Contreras-Flores et al., 2003).

Los sistemas de producción industrial de biomasa de microalgas que fueron construidos antes de los años 90, utilizaban sistemas abiertos tipo carrusel de canales poco profundos en forma de circuitos cerrados como los que se muestran en la Figura 2-7 (a). Estos sistemas tenían la ventaja del bajo costo de producción de biomasa en zonas geográficas específicas, pero requerían de un área de implantación bastante grande y presentaron varios problemas tales como bajas densidades celulares, fácil contaminación y difícil control del cultivo. Estos inconvenientes incentivaron el uso de materiales transparentes tales como el vidrio, policarbonatos y otros materiales translúcidos.

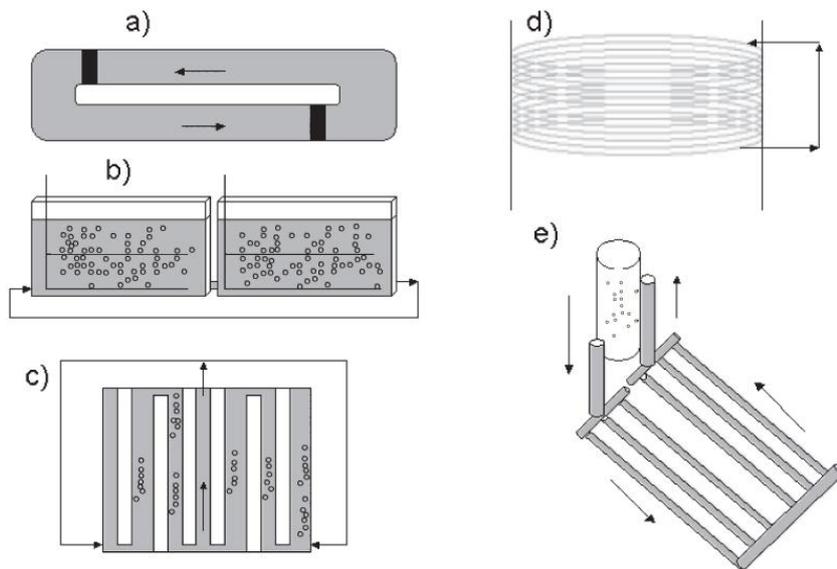


Figura 2-7: Tipos básicos de fotobiorreactores. a: Tipo carrusel. b: tipo plano. c: Con iluminación interna. d: Tipo serpentín. e: Tipo tubular horizontal

Nota: Tomado de: (Contreras-Flores et al., 2003)

2.3.1.3 Polietileno de Baja Densidad (PEBD)

En el presente proyecto, se han utilizado tubos de polietileno de baja densidad, abreviado como PEBD o LDPE por sus siglas en inglés (*Low Density Polyethylene*). Se trata de un polímero termoplástico conformado a partir del etileno con un grado de ramificación elevado (entre 20 y 40 ramas por cada 1000 átomos de carbono), lo que le provee densidad y resistencia menor a la del polietileno de alta densidad. Sin embargo,



es un plástico que posee una elevada resistencia al impacto y a la elongación. En la Tabla 2-5 se presentan las principales propiedades del PEBD (GIMDEPPM, 2010):

Tabla 2-5: Propiedades del Polietileno de Baja Densidad

Tipo	Propiedad	Rango
Generales	Densidad	0.917 - 0.932 g/cm ³
	Cristalinidad	40 - 50 %
Mecánicas	Módulo Elástico	0.172 - 0.283 Gpa
	Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.439 - 0.437
	Resistencia mecánica a la compresión	10.8 - 17.4 Mpa
	Resistencia mecánica a la tracción	13.3 - 26.4 Mpa
	Tenacidad a fractura	1.21 - 3.39 Mpa
Térmicas	Temperatura de transición vítrea	de -125 a -90°C
	Coefficiente de dilatación térmica lineal	100E-6 a 200E-6 1/°C
	Conductividad Térmica	0.322 - 0.348 W/mK
	Capacidad calorífica específica	1.84E3 - 1.92E3 J/kgK
Ópticas	Índice de refracción	1.57
Tecnológicas	Temperatura mínima de utilización	de -68 a -58°C
	Temperatura máxima de utilización	de 81 a 95°C
	Reciclabilidad	Sí
Químicas	Resistencia a los ácidos	Buena
	Resistencia a los álcalis	Elevada
	Resistencia a los disolventes orgánicos	Media
	Resistencia al oxígeno	Pobre
	Resistencia al ozono	Buena

2.4 Beneficios de la radiación solar sobre el tratamiento de las aguas residuales (desinfección)

Los procesos de desinfección de aguas tratadas (potables y residuales) tienen como principal objetivo la inactivación de microorganismos patógenos para reducir el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. Los métodos de desinfección se pueden clasificar en 3 tipos: químicos, físicos y fotoquímicos.



Los métodos químicos se basan en el potencial oxidativo de algunos compuestos químicos para producir daño a las paredes celulares de los microorganismos patógenos y desactivarlos. La elección del compuesto a utilizar depende de la caracterización del agua a tratar y la eficiencia de la desinfección depende de la dosificación y concentración del desinfectante (Acher et al., 1997). Sin embargo, a pesar de los buenos resultados de desinfección obtenidos con estos métodos, hace muchos años se reveló que los compuestos derivados del cloro (el compuesto más común en los métodos de desinfección química) producen y liberan otros productos orgánicos considerados tóxicos y potencialmente cancerígenos para los seres humanos y especies acuáticas (Brungs, 1973). De igual manera, el ozono (el compuesto más eficiente para este tipo de desinfección) tiende a escapar del agua durante la ozonificación y aumentar la concentración del mismo en el medio ambiente, lo cual es nocivo para salud de los operarios de las plantas de tratamiento.

Los métodos físicos son usados comúnmente en sistemas de tratamiento municipales en combinación con otros métodos para aumentar la eficiencia. Generalmente consisten en la retención mecánica de algunos microorganismos patógenos mediante filtros de arena o de membranas sintéticas (Acher et al., 1997).

Debido a los riesgos que se presentan en los métodos químicos, se han estudiado otros métodos más ecológicos y seguros, los fotosintéticos, que aprovechan la luz solar o radiación ultravioleta (natural o artificial) para producir una desactivación de indicadores fecales.

Inicialmente, los microorganismos patógenos no absorben la luz solar visible, por lo que se requiere de una celda solar que absorba la luz en el espectro visible y promueva la desinfección fotoquímica al transferir dicha energía al oxígeno disuelto presente en el agua a tratar para producir especies oxidativas activas (O_2 , agua oxigenada (H_2O_2), entre otras) que puedan alterar los constituyentes vitales celulares de los microorganismos patógenos, causándoles un daño letal que los inactive (Spikes & Livingston, 1969). Bajo condiciones controladas, en unidades piloto de desinfección, trabajando con agua residual doméstica y con un tiempo de 35 minutos de desinfección se ha logrado disminuir la población microbiana entre 4 y 5 órdenes de magnitud sin detectar ninguna reactivación de los microorganismos en un lapso de 7 días (Acher et al., 1994), lo cual da una idea del potencial de este método de desinfección que además resulta ecológico, no produce desechos tóxicos, es económico y puede ser aplicado a gran escala.



En los sistemas de tratamiento basados en microalgas, se espera que éstas adopten la función de las celdas solares anteriormente mencionadas y se produzca una asociación simbiótica entre las bacterias aerobias y las microalgas. En ambientes donde se pueda aprovechar una energía lumínica intensa, se espera que la población de microalgas aumente, elevando el pH y produciendo una saturación de oxígeno disuelto, lo cual es beneficioso para el proceso de desinfección. Experimentos efectuados en lagunas de alta tasa han demostrado que se pueden obtener reducciones de aproximadamente 2 unidades logarítmicas de coliformes *E. coli* en un tiempo de retención de 2 días (Craggs et al., 2004).

2.5 Aplicaciones de los fotobiorreactores para la obtención de biomasa

El producto de un fotobiorreactor de alta tasa es un efluente con una densidad igual o mayor a 600 mg/l de microalgas. La separación de estas células suspendidas (biomasa) del medio de cultivo (agua residual tratada) es necesaria para el aprovechamiento de los residuos del proceso de tratamiento biológico con microalgas. En un fotobiorreactor utilizado para el tratamiento de aguas residuales, la separación de las microalgas del sustrato tiene dos propósitos: a) liberación del agua tratada sin microalgas y b) cosecha de la biomasa para recuperación de recursos.

Los fotobiorreactores cerrados permiten mantener mejores condiciones ambientales para el cultivo. El principal objetivo es alcanzar densidades celulares altas para mejorar la eficiencia y calidad de la biomasa obtenida de manera que resulte un proceso rentable y de calidad (Sandoval, 2013)

Una de las aplicaciones más importantes de los fotobiorreactores en la actualidad es la producción de bio-hidrógeno mediante la biofotólisis realizada por algunos organismos al captar energía lumínica y generar un oxidante capaz de descomponer el agua en iones hidrógeno para luego generar dihidrógeno por biofotólisis indirecta. Debido a esta aplicación, en los últimos años se han realizado varias investigaciones para mejorar el rendimiento y productividad de los fotobiorreactores mediante manipulación biotecnológica en las microalgas (Brentner et al., 2010).

Recientemente, algunas investigaciones se han enfocado en encontrar microalgas capaces de captar rápidamente el CO₂ que puedan ser cultivadas en ambientes flexibles. La aplicación de este tipo de microalgas estaría destinada a tratar las emisiones gaseosas de las industrias además de la obtención de la biomasa que puede utilizarse para otros



fines como la producción de biodiesel, industria alimenticia, acuicultura, entre otras (Sandoval, 2013).

2.5.1 Métodos de Cuantificación de Biomasa

La cuantificación de la biomasa es una variable importante que permite establecer tasas de producción, consumo de nutrientes y balance de masa en los procesos biológicos. Tradicionalmente se han aplicado métodos de cuantificación basados en recuento celular o peso celular que son métodos basados en propiedades físicas o en la actividad biológica (Arnáiz-Franco et al., 2000).

Para estimar la cantidad de biomasa en cultivos de microalgas, los métodos más comunes son los que presentan a continuación en la Tabla 2-6 (Arnáiz-Franco et al., 2000):

Tabla 2-6: Métodos de cuantificación de biomasa

Método	Concepto	Observaciones
Gravimétrico	Expresa la cantidad de biomasa en función del peso seco por unidad de volumen, estimado a partir de ensayos de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV). Su cuantificación incluye microorganismos activos, muertos, material inerte, polímeros extracelulares y materia orgánica absorbida.	Metodología simple, pero de poca reproducibilidad que requiere de un tiempo considerable para su ejecución.
Espectrofotométrico	Relaciona el valor de turbidez de una muestra con el número total de microorganismos. Requiere de una calibración previa mediante otro método para establecer una relación entre la turbiedad y la biomasa.	Es un método rápido, pero de muy baja sensibilidad, depende de la calibración y en general presenta problemas de interferencia debido a partículas ajenas a la



biomasa.

<p>Microscópico</p>	<p>Puede ser mediante recuento celular de colonias en cámaras o por microscopía de epifluorescencia; en el primero se realiza un conteo de microorganismos en la cuadrícula central de la cámara y se obtiene un valor del número de microorganismos por unidad de volumen. En la microscopía de epifluorescencia se aplica un agente fluorocromo que tiñe los microorganismos y permite su conteo mediante microscopía óptica.</p>	<p>El método es simple y rápido; no obstante, su reproducibilidad es cuestionada y requiere de un equipamiento costoso.</p>
<p>Cinético (Indirecto)</p>	<p>Se determina a través de la tasa de respiración, que es la velocidad con la que los microorganismos utilizan el oxígeno en función de la respiración endógena de mantenimiento celular y a la oxidación del sustrato orgánico presente en la muestra. La tasa de respiración total referida a la concentración de microorganismos, expresada como SSV, es la tasa de respiración específica y define la actividad biológica en un momento dado de una biomasa específica.</p>	<p>Es un método indirecto que requiere correlacionar la tasa de respiración exógena (DBO) con la tasa específica (SSV) en un cultivo biológico.</p>

Fuente: (Arnáiz-Franco et al., 2000)



2.5.2 Métodos de Cosecha de Biomasa

El método de cosecha depende del tipo de microalgas, pero siempre debe considerarse el alto contenido de agua en la biomasa que, según la aplicación que se le vaya a dar a la biomasa, debe ser removido para permitir la cosecha de la misma. Se deben emplear varios procesos unitarios que permitan concentrar las microalgas luego de la cosecha, considerando siempre que los mismos deben ser rentables. Entre los métodos más utilizados se encuentran la centrifugación, filtración, floculación y electroforesis (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Varios estudios reportan el uso de la centrifugación como un método muy efectivo de cosecha de la biomasa (Chen et al., 2011; Christenson & Sims, 2011; González et al., 1997; Li et al., 2011). Se han obtenido porcentajes de recuperación de 80 a 90% sin presencia de daño celular, además de la facilidad de limpieza; sin embargo, su alto costo vuelve inaccesible a esta tecnología para sistemas descentralizados. De igual manera, la electroforesis no es factible debido a su alto requerimiento energético y de control.

La floculación se presenta como la opción de mayor factibilidad para la cosecha de biomasa en sistemas descentralizados. Se han reportado varios métodos de floculación de microalgas, tales como la variación del pH, la adición de coagulantes inorgánicos o polímeros naturales (Chen et al., 2011). Considerando la cantidad total y la calidad de la biomasa recuperada en el producto final, se ha demostrado que el Quitosano o ciertos tipos de almidones catiónicos podrían ser buenas fuentes de floculantes naturales y ecológicos (Rashid et al., 2013; Vandamme et al., 2010). Se ha reportado que estos productos son relativamente baratos con un costo aproximado de \$2/kg de Quitosano y \$1-3/kg de almidón. Además, son polímeros naturales que, a diferencia de los coagulantes inorgánicos a base de metales, el producto final no representa ninguna amenaza para el medio ambiente u organismos. En los resultados experimentales reportados por los investigadores anteriormente mencionados se ha concluido que la adición de alrededor de 60 mg/l de Quitosano y 20 mg/l de almidón catiónico incrementa la eficiencia de la cosecha y de la floculación en un 80%. Una vez que las microalgas se hallan juntado en flóculos grandes, pueden ser procesadas a través de microfiltros o permitir su sedimentación para su posterior cosecha y aprovechamiento.



3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación y Condiciones Ambientales

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Ucubamba, ubicada en la ciudad de Cuenca, en la región austral del Ecuador (Figura 3-1). La planta está situada al norte de la ciudad, en el sector Ucubamba. Ocupa un área de aproximadamente 45 Hectáreas y aplica un método de tratamiento basado en lagunas de estabilización. El sistema de alcantarillado que descarga a la PTAR cubre el 95% de las aguas residuales del sector urbano de la ciudad.

La PTAR Ucubamba cuenta con un sistema de regulación y control de caudal afluente; la primera etapa consta de un cajón de llegada con una compuerta de admisión que recibe el caudal desde el emisario final del sistema de alcantarillado, en segunda instancia el caudal de ingreso pasa a un sistema de cribas que se encarga de la remoción de sólidos de gran tamaño y finalmente llega a un desarenador antes de ir al canal de ingreso de aguas residuales crudas al sistema de lagunas.

Ucubamba presenta las mismas condiciones climáticas que la zona urbana de Cuenca, con una temperatura promedio de 15 ± 2 °C, a una altura de 2500 msnm y una precipitación media anual de 800 mm. Al estar en un país asentado sobre la línea ecuatorial de la Tierra, la incidencia de la radiación solar es mayor que en otras zonas del planeta. Delgado & Orellana (2015) estiman una radiación solar global promedio diaria anual en Cuenca de cerca de $16 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$, en una ventana horaria de 12 horas de luz solar, desde las 6:30 hasta las 18:30 horas.

El fotobiorreactor está localizado junto al canal de ingreso, en el lugar donde se ubican varios prototipos para la investigación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales operados por ETAPA EP. Esto ha permitido aprovechar las instalaciones del proyecto de investigación vecino (Reactor UASB) como almacén de bodega para suministros, equipamiento y fuente de energía eléctrica.

Para acceder al área del fotobiorreactor se ha establecido el uso de equipos de protección como: mandil, guantes, mascarilla, además es necesario la utilización de desinfectantes una vez concluida la jornada de trabajo.



Figura 3-1: Ubicación de la PTAR Ucubamba

Latitud 2°52'37\"S – Longitud 8756'38.02\"O

Google (s.f) [Planta de tratamiento de aguas residuales Ucubamba, Cuenca - Ecuador]. Recuperada el 24 de Noviembre, 2017, de: <https://www.google.com.ec/maps/@-2.8716109,-78.9396048,16.25z>

3.2 Materiales

3.2.1 Materiales disponibles

La principal limitante de los materiales constructivos es el número de tubos disponibles de PDBD (Polietileno de baja densidad) y elementos de conexión. La Universidad de Cuenca, a través del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales y el apoyo del proyecto de equipamiento a través del programa de canje de deuda Ecuador - España han puesto a disposición del proyecto los siguientes materiales presentados en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Materiales disponibles para la construcción del fotobiorreactor

Descripción	Cantidad	Diámetro	Diámetro	Longitud (m)
		exterior (mm)	interior (mm)	
Tubos de PDBD	11	90	84	2
Codos 90°	20	-	90	
Tee	3	-	90	
Uniones	1	-	90	
Válvulas de paso	3	-	90	

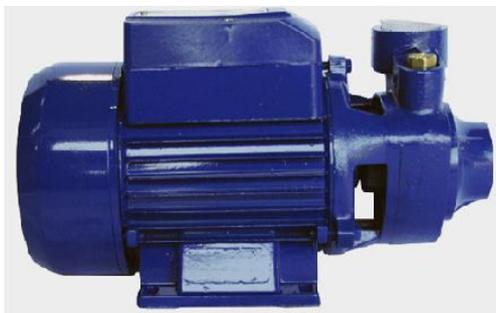
Tapones PVC hembra	4	-	90	
Llave de paso	1	-	25	
Manguera PVC	1	-	25	10
Tanque de reserva	1	-	0.6	0.8

3.2.2 Sistema de impulsión hidráulico

Para la operación del prototipo se dispone de una bomba peristáltica de precisión y una bomba hidráulica centrífuga, tal como se detalla en la Tabla 3-2, donde además se incluye la utilidad de las mismas en el esquema del prototipo.

Tabla 3-2: Equipos disponibles para el sistema de impulsión hidráulico

Elemento	Cantidad	Q (l/min)	H _{máx} (m)	Utilidad	Descripción
Bomba peristáltica	1	0.5 (máx)	6	Recirculación del fluido	Bomba Peristáltica Digital Masteflex L/S DRIVE 90 + Cabeza de Bomba EASY LOAD II
Bomba centrífuga	1	30	2	Llenado del fotobiorreactor	Bomba Centrífuga Century QB60 Clase B.



a) Bomba Centrífuga Century QB60 Clase B



b) Bomba Peristáltica Masterflex L/S

Figura 3-2: Equipos disponibles para el sistema de impulsión hidráulico



Para cada tipo de bomba se requieren tuberías de aspiración e impulsión; los materiales disponibles se detallan a continuación en la Tabla 3-3 para la bomba peristáltica y en la Tabla 3-4 para la bomba centrífuga:

Tabla 3-3: Tuberías disponibles para la bomba peristáltica

	Descripción	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Longitud (m)
Tubería de aspiración	Manguera de silicón transparente flexible Masterflex L/S 18	-	9	3
Tubería de impulsión	Manguera de silicón transparente flexible Masterflex L/S 18	-	9	4.5

Tabla 3-4: Tuberías disponibles para la bomba centrífuga

	Descripción	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Longitud (m)
Tubería de aspiración	Manguera de PVC flexible		25	4
Tubería de impulsión	Manguera de PVC flexible		25	4

3.2.3 Sistema de aireación

El sistema de aireación consta principalmente de un compresor de aire (Figura 3-3) y mangueras flexibles con micro-burbujeadores en sus extremos conectados al tanque de reserva. Se dispone de un compresor de aire Modelo MTS-AP135 de 135W de potencia y flujo de aire máximo de 160 l/min. Para lograr un correcto funcionamiento del compresor de aire se ha instalado un temporizador que permita trabajar con ciclos de encendido y apagado para evitar el sobrecalentamiento del motor. El temporizador es de tipo mecánico, activado por un sistema giratorio que permite configurar ciclos de encendido o apagado en períodos de 30 minutos.



Figura 3-3: Compresor de aire disponible

3.3 Registros de datos

Los análisis de laboratorio de la caracterización del agua residual cruda y de las lagunas de estabilización fueron proporcionados por la jefatura de la PTAR Ucubamba. Los análisis de laboratorio del efluente del fotobiorreactor fueron realizados en los laboratorios de la Dirección de Gestión Ambiental de ETAPA EP (DGA-ETAPA).

ETAPA EP realiza los muestreos del agua residual cruda y de las lagunas de estabilización periódicamente los días lunes y miércoles de cada semana. Los experimentos con el fotobiorreactor se realizaron los días anteriormente mencionados para utilizar el registro antes mencionado como datos iniciales del agua residual antes de ser tratada y compararla con el efluente del fotobiorreactor.

3.3.1 Análisis de Laboratorio de Aguas Residuales en la PTAR Ucubamba – Registro Histórico

En la Tabla 3-5 se muestran los valores promedio del registro histórico de los análisis de laboratorio realizados en el canal de ingreso (afluente) a la PTAR Ucubamba con datos promedio anuales desde el año 2000 al 2010 (**Anexo 1**) y una comparativa con los valores límites de descarga a un cuerpo de agua dulce para efluentes de Aguas Residuales establecidas por la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes: Recurso Agua, Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente del Ecuador (**Anexo 2**).



Tabla 3-5: Comparativa entre la concentración Media (10 años) en el Afluyente de Agua Residual de la PTAR Ucubamba y la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes

Parámetro	Unidad	Promedio	Límite Máximo/Norma
pH	-	*7.19	6 - 9
DBO	mg/l	94±15	100
DQO	mg/l	241±24	200
Sólidos totales	mg/l	*524	1600
Sólidos Suspendidos totales	mg/l	161±33	130
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/l	104±55	No establece
Sólidos Sedimentables	mg/l	3.5±0.4	No establece
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	9.1±1.5	30
Nitrógeno Orgánico	mg/l	8.2±1	50
Nitritos + Nitratos	mg/l	*0.41	No establece
Fósforo	mg/l	5.2±0.4	10
Sulfatos	mg/l	*47	1000
Sulfuros	mg/l	*<0.16	0.5
Hexano SS	mg/l	27.8±5.3	No establece
Coliformes (termo tolerantes) (1)	NMP/100ml	1.31E+07	10000
Coliformes (termo tolerantes) (2)	NMP/100ml	3.03E+07	10000
Parásitos	N°/l	13±12	No establece
Aluminio	µg/l	1410±483	5000
Bario	µg/l	*<8	2000
Cromo	µg/l	<12	500
Cobre	µg/l	<26	1000
Níquel	µg/l	19±9	2000
Zinc	µg/l	160±96	5000
Plomo	µg/l	35±15	200
Cadmio	µg/l	<3	20
Arsénico	µg/l	*<2.1	100
Hierro	µg/l	*2052	10000



Manganeso	μg/l	*174	2000
Mercurio	μg/l	*<0.19	5
Compuestos organoclorados	μg/l	2541	50
Compuestos organofosforados	μg/l	2521	100

* Únicamente se tiene registro de un valor para el año 2010.

Como se puede observar en la Tabla 3-5, en la comparación entre los valores de agua residual cruda (afluente) que ingresa a la PTAR Ucubamba y los valores máximos permitidos por la Normativa Ecuatoriana, no existen inconvenientes en el cumplimiento de la norma con los metales pesados. El mismo caso se da para el fósforo, sulfatos, sulfuros y nitrógeno. El valor medio de la DBO en el agua residual cruda está muy cerca del límite, sin embargo, como son valores promedio es muy probable que existan muestras en las que se supere el límite establecido por la norma. La demanda química de oxígeno está ligeramente por encima de la normativa al igual que el valor de los sólidos suspendidos totales, por lo que se deberá controlar dichos parámetros para medir la eficiencia del fotobiorreactor. El parámetro crítico en este análisis es el conteo de coliformes termotolerantes que está muy por encima del límite normado.

En función de este análisis comparativo, del potencial de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales y de la disponibilidad de los laboratorios de la DGA ETAPA, se ha planteado realizar pruebas en el fotobiorreactor para comprobar su eficiencia en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y de los coliformes totales y termotolerantes, además se requiere realizar ensayos de sólidos suspendidos volátiles y pH en el medio para analizar el desarrollo de la biomasa.

3.4 Consideraciones de diseño y operación del fotobiorreactor

Para el diseño del fotobiorreactor tubular cerrado que cumpla con los objetivos establecidos se consideraron varios aspectos con el fin de aprovechar los materiales disponibles y facilitar el proceso constructivo garantizando su correcto funcionamiento, facilidad operativa, de transporte y economía.

El primer paso fue determinar el proceso de circulación del agua residual en el fotobiorreactor; en la literatura consultada, se han reportado varios diseños que permiten aprovechar la luz solar en donde el agua residual circula dentro del fotobiorreactor un determinado tiempo en modo “*batch*” hasta que las microalgas puedan digerir los nutrientes y liberar oxígeno dentro del sustrato.



En el diseño del prototipo es esencial determinar la forma en la que el agua residual y las microalgas serán añadidas al fotobiorreactor; varios reportes indican que las microalgas, al igual que otros microorganismos pueden presentar una fase de latencia al entrar en contacto con el agua residual en donde no se observa ninguna reacción ni desarrollo de la biomasa. El tiempo de duración de la fase de latencia depende de la especie de microalga con la que se trabaje; varios investigadores han reportado que la especie *Chlorella* no presenta esta fase (Li et al., 2011; Wang et al., 2010) y en algunos casos, cuando se tiene un período de adaptación al medio de cultivo se ha observado que el crecimiento celular es mínimo en los primeros 2 a 3 días del cultivo (Blair et al., 2014). Por lo expuesto se debe considerar la implementación de un tanque de inoculación en donde se pueda añadir las microalgas al agua residual antes de su paso por el fotobiorreactor.

Li et al. (2011) reportan que la etapa de crecimiento exponencial de la microalga *Chlorella* dura entre 4 y 5 días hasta alcanzar una etapa estacionaria y alcanzar una concentración microalgar en el medio capaz de remover entre 80 y 90% de nutrientes. Los reportes han determinado que un crecimiento óptimo de las microalgas se produce a una temperatura de entre 20 y 25°C con un pH del medio entre 7 y 9. El agua residual de Cuenca, históricamente ha presentado un valor de pH de 7 y la temperatura ambiental es 15 ± 2 °C por lo que se esperó un crecimiento menor.

3.4.1 Tipo de fotobiorreactor

Los tubos circulares disponibles limitaron el diseño del fotobiorreactor tubular cerrado. El fotobiorreactor debe permitir el cultivo de distintas especies de microalgas aprovechando la luz solar como fuente de iluminación y energía. En un sistema de estas características no existe retro-mezclado, por lo que las células y el sustrato no se mezclan aguas arriba. Inicialmente, este tipo de fotobiorreactores trabajan de manera equivalente a la de un Reactor *Batch* en donde el tiempo de retención en dicho fotobiorreactor equivale a la posición del flujo dentro del fotobiorreactor tubular cerrado (Cruz, 2015).

3.4.2 Longitud máxima

La longitud y disposición de los tubos debe facilitar el transporte y minimizar el área de implantación para aprovechar mejor el espacio disponible. La longitud máxima depende principalmente de la concentración de oxígeno a la salida del receptor solar. Aplicando



la *Ecuación 2* se estableció un límite que garantice que no se produzca foto-inhibición por acumulación de oxígeno en el medio.

Hernández-Pérez & Labbé (2014) reportan en su investigación que con una saturación de oxígeno 300% mayor a la concentración crítica para la mayoría de las especies de microalgas se ha determinado una reducción del 25% de las capacidades reproductivas de dichos organismos. Se esperó obtener un cultivo de alta densidad celular dentro del fotobiorreactor tubular cerrado, sin embargo, el objetivo de este estudio es analizar su potencial en el tratamiento de aguas residuales, por lo que, en este caso, una reducción del desarrollo de biomasa de tal magnitud no representa un inconveniente mayor.

3.4.3 Facilidad constructiva

El fotobiorreactor debe poder construirse en zonas rurales con pocos recursos, la consideración principal para la configuración geométrica del receptor solar fue la facilidad constructiva; se planteó por lo tanto un diseño que ahorre tiempo, dinero y espacio de terreno. Se decidió utilizar la longitud total de los tubos para evitar cortes y desperdicios; además los 2m de longitud total de los tubos están dentro del rango de longitudes factibles para evitar concentraciones críticas de oxígeno que puedan disminuir el desarrollo de las microalgas en fotobiorreactores tubulares cerrados.

3.4.4 Área de exposición al sol

Según recomendaciones dadas por diferentes autores, es de vital importancia considerar el diseño de un receptor solar que tenga la mayor área de exposición al sol con relación al volumen que fluye dentro del mismo y así maximizar la cantidad de energía lumínica que llega a las microalgas aprovechando al máximo sus capacidades fotosintéticas. El receptor solar debe minimizar los elementos traslapados que puedan producir sombras y permitir que la luz del sol sea absorbida con igual eficiencia en todas las regiones.

3.4.5 Geometría del fotobiorreactor

Existen varias configuraciones geométricas para fotobiorreactores tubulares cerrados; dentro de las más importantes están (Contreras-Flores et al., 2003):

- Helicoidales (forma piramidal)
- Verticales
- Horizontales
- Planos

- Carrusel
- Serpentin (forma cilíndrica)

Estudios realizados por Morita et al., (2000) indican problemas en el funcionamiento de los reactores de tipo helicoidal (Figura 3-4). Además de su difícil construcción, el mayor inconveniente está en la acumulación de oxígeno dispareja en las zonas más elevadas del receptor solar. Los reactores verticales requieren de un sistema de impulsión de gran potencia para garantizar la recirculación del flujo y presentan problemas de acumulación de aire en la parte superior de los tubos en la zona de unión mediante codos. Para las configuraciones tipo carrusel y serpentin se requiere un tipo de tubos distinto al que se tiene disponible, por lo que también se han descartado estos modelos.

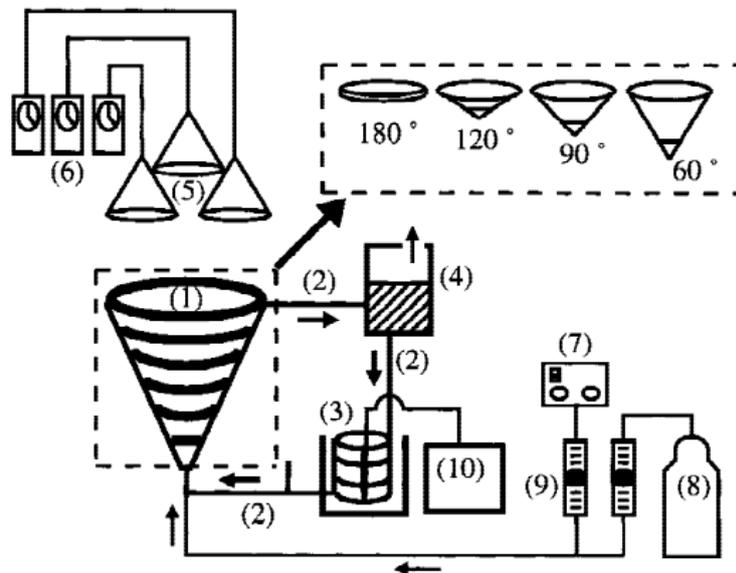


Figura 3-4: Reactor helicoidal propuesto por Morita et al. (2000)

Finalmente se ha llegado a la conclusión de que un arreglo horizontal de tubos en línea, unidos con codos en sus extremos para el receptor solar es la mejor opción. Este es el diseño con mayor factibilidad, donde la distribución del oxígeno acumulado (que tiende a ubicarse en la región superior) se presenta de manera más uniforme en el receptor solar, el flujo circula con menor presión y los elementos necesarios para su construcción están disponibles dentro de los materiales suministrados por la Universidad de Cuenca para este proyecto.



3.4.6 Estructura de soporte

El receptor solar debe apoyarse sobre una estructura de soporte que garantice su estabilidad y resista la exposición a las cargas de viento, lluvia y vibraciones. Se propuso un sistema metálico con un arreglo de tubos cuadrados perpendiculares y agarraderas metálicas para sujetar los tubos. Adicionalmente se consideró colocar el receptor solar a diferentes ángulos de inclinación respecto a la horizontal y aplicar un recubrimiento antioxidante para evitar su deterioro al estar expuesto a las condiciones ambientales de la zona donde se desarrolla el proyecto.

3.4.7 Mezclado

Para optimizar la mezcla del sustrato y remover la saturación de oxígeno en el medio, se instaló un tanque abierto y un aireador junto al receptor solar. Se planteó una secuencia operativa que permita que el agua residual, luego de circular por el receptor solar, se dirija al tanque en donde se activa el aireador (compresor de aire + micro burbujeadores) que ayuda al proceso de mezclado, inyecta una cantidad considerable de CO_2 disuelto en ambiente en el sustrato y provoca una sobre oxigenación en el fondo del tanque que obliga al oxígeno saturado a escapar por la parte superior del mismo. Inicialmente se propuso la implementación de un Sistema *Airlift* junto con un dispositivo desgaseador en la parte superior (Figura 3-5); pero el costo, dificultad constructiva y operacional de dicho sistema lo vuelve inaccesible para este proyecto y por ello se optó por el sistema del tanque abierto con aireador. Sandoval (2013) determina que para inyectar el CO_2 presente en el aire atmosférico (0.04% (v/v)) con una tasa de transferencia de $1.822 \times 10^{-3} \text{ g CO}_2/\text{m}^3\text{h}$ mediante un sistema de aireación que inyecte aire a $7.405 \text{ g aire}/\text{m}^3.\text{h}$ en un reactor de 15 litros de volumen, se requiere de un compresor con una potencia de 20W. Debido a que se cuenta con un compresor de 135W, se concluye que éste funcionará adecuadamente para un volumen cercano a 100 litros (volumen aproximado del tanque abierto instalado junto al reactor).

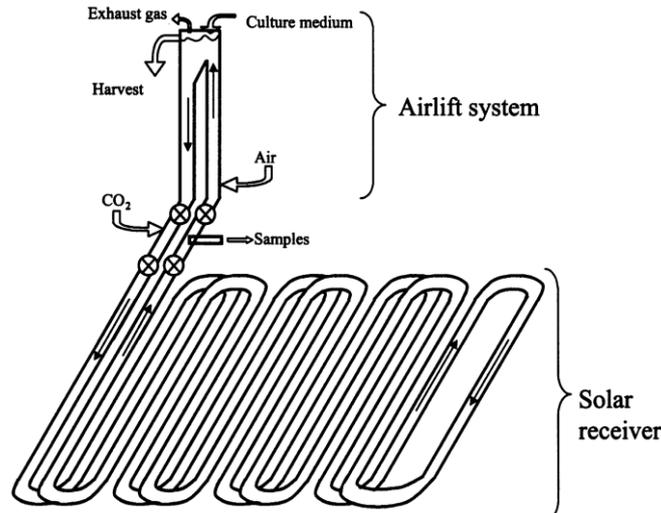


Figura 3-5: Reactor con sistema airlift propuesto por Sobczuk, Camacho, Rubio, Fernandez, & Grima, (2000)

3.4.8 Hidráulica del fotobiorreactor

Como dispositivos de control se instalaron válvulas de cierre en la entrada y en las 2 salidas del receptor solar. Se consideró que el proyecto de investigación continúe en el futuro con la implementación de otros dispositivos que ayuden a mejorar la producción de biomasa y mejorar el tratamiento. En este sentido, las válvulas de cierre permitirán controlar el caudal al ingreso y salida del receptor solar en caso de utilizar una bomba hidráulica de mayor potencia. Se consideró una válvula de cierre pequeña en la salida superior del receptor solar para recoger muestras del efluente sin alterar la operación del fotobiorreactor.

No se consideró la necesidad de válvulas de aire debido a que la presencia de burbujas y aire dentro del receptor solar no afecta significativamente el desarrollo de las microalgas (ya que se efectúan procesos aerobios) y la presión ejercida dentro de las tuberías por el aire en el momento del llenado (además de ser muy pequeña) puede ser controlada maniobrando las válvulas de cierre a la salida del receptor solar.

3.4.9 Sistema de impulsión

Se contó con una bomba peristáltica configurada para trabajar con un caudal máximo de 500 ml/min y una altura máxima de 6 mca. Debido al bajo caudal y velocidad de circulación se podría producir la sedimentación y acumulación de microalgas en las paredes de los tubos, disminuyendo el área de exposición al sol. Para ensayos futuros, se



recomienda utilizar una bomba de mayor potencia para optimizar los procesos de producción de biomasa y tratamiento de aguas residuales.

3.5 Construcción del fotobiorreactor piloto

La construcción del receptor solar y de la estructura metálica de soporte se realizó al mismo tiempo para comprobar que las medidas de ambos sistemas sean congruentes. El arreglo de tuberías en paralelo debe conectarse con la unión de dos codos de 90° (para formar una “U”) con pegamento especial para materiales de PVC.

Se ha recubierto la estructura metálica de soporte con pintura anticorrosiva para impedir el deterioro de la misma y para mejorar la presentación visual de la estructura. La estructura de soporte es de inclinación variable gracias al riel colocado en la parte posterior de la estructura que permite colocarla a 5 diferentes ángulos (30°, 45°, 60°, 75°, 90°) con respecto a la horizontal.

Una vez colocado el receptor solar en la estructura metálica de soporte se comprobó la estanqueidad del sistema con agua potable maniobrando las válvulas, verificando que no existan fugas y que la circulación del fluido dentro del fotobiorreactor sea la adecuada (Anexo 15).

3.6 Operación del fotobiorreactor piloto

3.6.1 Inóculo inicial para la obtención de biomasa

Se ha determinado que una densidad algar inicial de 50 mg/l puede ser suficiente para que las microalgas puedan crecer en el agua residual. En el análisis histórico de los efluentes de las piscinas facultativas y de maduración, se ha determinado que en promedio el agua residual presenta una concentración de SSV (interpretado como la cantidad de biomasa) de alrededor de 100 mg/l, por lo que se esperó no tener inconvenientes con el inóculo inicial.

En el proyecto, se utilizó como inóculo el agua residual presente en las lagunas de maduración de la PTAR Ucubamba; es en esta zona en donde se observa el mayor crecimiento de microalgas, sin embargo, la concentración de SSV por lo general es de aproximadamente 40 mg/l por lo que fue necesario un periodo de densificación de biomasa en el fotobiorreactor previo a los ensayos. Los inóculos de lagunas de maduración fueron trasladados al fotobiorreactor sin ningún tratamiento o acondicionamiento previo por lo que las familias y especies de microalgas presentes en

el fotobiorreactor son muy variadas. En la etapa de densificación de biomasa algar se utilizó abono agrario con concentraciones variables de NPK (Fotografía 3-1)



Fotografía 3-1: Abono Agrario NPK

Para la obtención de la biomasa de inoculación para el tratamiento de agua residual se trabajó en modo *Batch* (recirculación del flujo en el fotobiorreactor) llenando tanto el receptor solar como el tanque de reserva con una mezcla de agua residual tratada presente en las lagunas de maduración de la PTAR Ucubamba (Fotografía 3-2) (en donde se encuentran varias especies de microalgas y cianobacterias) y el agua residual cruda del canal de ingreso.



Fotografía 3-2: Agua residual tratada de las lagunas de maduración de la PTAR Ucubamba

El sistema debe permitir la circulación de la mezcla mediante la correcta calibración del caudal de la bomba peristáltica y de la válvula ubicada a la salida del receptor solar. En los ensayos llevados a cabo se logró un caudal máximo de 0.5 l/min en la bomba; luego se maniobró la válvula a la salida del receptor solar hasta conseguir el mismo caudal (comprobado mediante aforos) y así lograr un equilibrio en el sistema permitiendo que el sustrato fluya por el fotobiorreactor con el mismo caudal a la entrada y salida durante



el tiempo requerido para completar las etapas de adaptación y desarrollo de las microalgas.

3.7 Análisis de Laboratorio

Debido al alcance de este proyecto, se han establecido las siguientes variables de control para determinar la eficiencia del tratamiento: pH, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, demanda bioquímica de oxígeno y coliformes totales y termotolerantes.

El nivel de pH en el cultivo está influenciado por la producción de microalgas, la alcalinidad, la respiración, la actividad microbiana y la concentración de CO₂ en el medio. Cada especie de microalgas necesita un sustrato con un pH dentro de un rango específico. Park, Craggs, & Shilton (2011) reportan que para la mayoría de especies dulceacuícolas el pH óptimo está en un valor cercano a 8.

Los SST y SSV son ensayos comunes en las aguas residuales y lodos. El valor de SSV se puede interpretar como el contenido de materia orgánica, teniendo en cuenta que a 550 ± 50 °C la materia orgánica se transforma en CO₂ y agua que se volatiliza, dejando a la fracción inorgánica en forma de cenizas; sin embargo, se debe considerar que en este proceso también se produce una descomposición o volatilización de ciertas sales minerales. Otra manera de cuantificar el contenido de materia orgánica en el medio es la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno que mide la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación bioquímica de la materia orgánica carbonosa aprovechada por los organismos aerobios, la oxidación del nitrógeno y formación de compuestos reductores químicos.

La cantidad de coliformes totales y termotolerantes en el medio son indicadores de contaminación biológica. Los coliformes totales se refieren a la cantidad total de coliformes de todos los grupos, los coliformes termotolerantes se refiere a las de origen fecal y son un mejor indicador de contaminación. Se debe controlar el número de coliformes en el agua residual ya que las normativas establecen un valor máximo permisible para que su descarga en los cuerpos de agua no produzca una contaminación que altere el ecosistema acuático y ponga en riesgo la vida de los organismos que ahí habitan.



4 RESULTADOS

4.1 Parámetros de diseño

4.1.1 Velocidad mínima

La velocidad de flujo dentro del fotobiorreactor debe ser tal que produzca un flujo turbulento; considerando los valores de la Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Valores considerados para el cálculo de la velocidad máxima y mínima

Parámetro	Valor	Unidades	Observación
Re	4000		Valor mínimo para flujo turbulento
\varnothing_i	84	mm	
ρ	1040	kg/m ³	Recomendado para aguas residuales
μ	1.003E-03	kg/ms	Para una temperatura de 20°C

Donde: Re = Número de Reynolds, \varnothing_i = Diámetro nominal, ρ = Densidad del fluido, μ = Viscosidad dinámica del fluido.

Utilizando la Ecuación 1, despejando la velocidad de obtiene:

$$V_{\text{mínima}} = 0.046 \text{ m/s}$$

4.1.2 Velocidad máxima

Una vez calculada la velocidad mínima se calculó la velocidad máxima que no produzca daño celular, para lo cual utilizando la Ecuación 1, Ecuación 2, Ecuación 3, y Ecuación 4 se resuelve un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas y con los valores de la Tabla 4-2 (sin considerar el número de Reynolds):

Tabla 4-2: Valores utilizados para el cálculo de la velocidad máxima

Parámetro	Valor	Unidades	Observación
k	0.02	mm	Rugosidad recomendada para tuberías de PDBD
λ	17	μm	Longitud promedio de una célula de <i>Chlorella sp</i>

Se obtiene:

$$f = 0.017$$

$$\epsilon = 10.74$$

$$Re = 260867$$



$$V_{max} = 3 \text{ m/s}$$

4.1.3 Longitud máxima

Para el cálculo de la longitud máxima del receptor solar se consideraron los siguientes parámetros presentados en la Tabla 4-3:

Tabla 4-3: Parámetros de cálculo para determinación de la longitud máxima

Parámetro	Valor	Unidades	Observación
$[O_2]_{entrada}$	18	mg/l	Corresponde al 150% de concentración O_2 disuelto para la producción fotosintética (Bain & Stevenson, 1999).
$[O_2]_{salida}$	1	mg/l	Valor mínimo que puede estar presente en cualquier lugar y momento del fotobiorreactor en instancias críticas (Orozco, 2005).
R_{O_2}	6.4E-2	kg/m ³ s	Correspondiente a la productividad de biomasa de 1.66gr/L día (Vásquez & Brenes, 2015).

Se calculó la longitud máxima con la velocidad máxima y con la velocidad de funcionamiento de la bomba centrífuga ya que se encuentra en el rango de flujo turbulento, utilizando la Ecuación 2 se obtubieron los siguientes resultados presentados en la Tabla 4-4:

Tabla 4-4: Longitud máxima del fotobiorreactor en función de la velocidad

	V	L
	(m/s)	(m)
Velocidad máxima	3	797
Velocidad de funcionamiento de la bomba centrífuga	0.09	24

Dado que una velocidad de 3 m/s es demasiado alta para el funcionamiento del fotobiorreactor y presentaría varios inconvenientes (daño de los accesorios como los codos y requerimiento de una bomba de gran potencia para recircular el caudal), se tomó como aproximación una longitud máxima de 24 metros (longitud ideal para el funcionamiento del fotobiorreactor con una bomba centrífuga común).

4.2 Configuración del receptor solar del fotobiorreactor piloto

Con base en las consideraciones planteadas y resultados obtenidos se estableció el diseño del receptor solar de forma horizontal, con los tubos conectados entre ellos mediante la unión de 2 codos de 90° para formar uniones tipo U. El receptor solar tiene 2 entradas y 2 salidas, además posee 4 válvulas de control (2 a la entrada y 2 a la salida) y permite la circulación de un volumen total de 128 litros, tal como se muestra en la Figura 4-1:

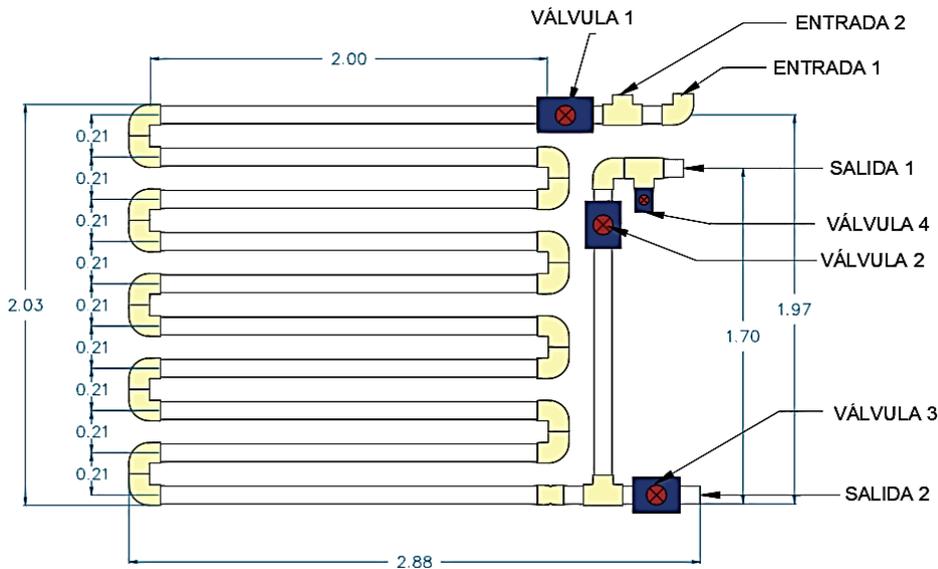


Figura 4-1: Vista esquemática del receptor solar del fotobiorreactor diseñado

La entrada 1 fue pensada para conectar el sistema de impulsión hidráulica que llena el fotobiorreactor y permite la recirculación del fluido dentro del mismo; la entrada 2 sirve como una vía para inyectar nutrientes, dióxido de carbono u otros elementos que se requieran agregar al sustrato para mejorar el desarrollo de la biomasa.

La válvula 1 controla el caudal de ingreso al receptor solar, la válvula 4 funciona para el desfogue del agua residual y permite obtener muestras en distintos tiempos de retención sin alterar el flujo del agua residual en el fotobiorreactor; las válvulas 2 y 3 pueden maniobrase para operar el fotobiorreactor en distintos modos de operación.

Además del receptor solar, se requirió una bomba hidráulica para garantizar la recirculación del agua residual dentro del receptor solar y un compresor de aire con un dispositivo difusor aplicado a un tanque abierto que a más de funcionar como una reserva permite aplicar 3 procesos: (a) inyección de aire y CO₂ concentrado en el ambiente, (b) expulsión del oxígeno saturado (generado por la fotosíntesis de las

microalgas dentro del receptor solar) en el agua residual, y (c) mejoramiento del proceso de mezclado. En la Figura 4-2 se presenta la estructura del fotobiorreactor completo con los elementos utilizados en el presente estudio.

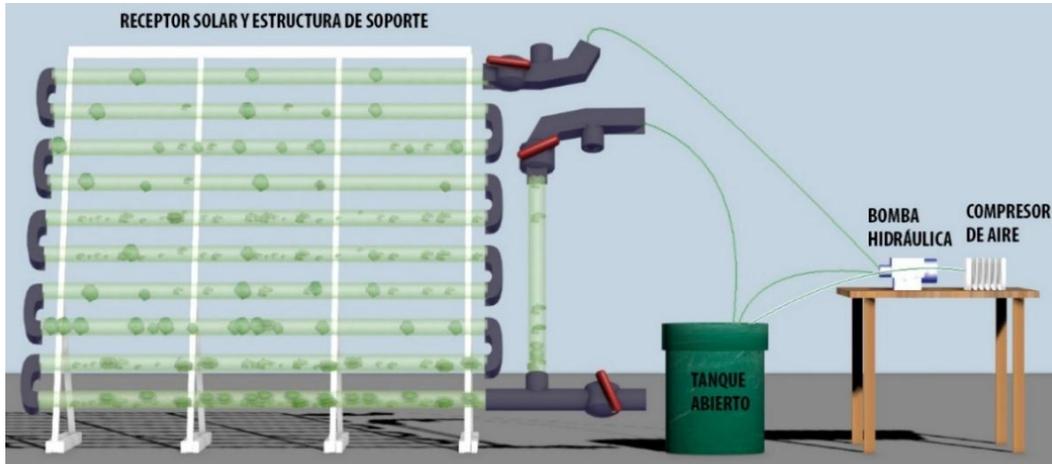


Figura 4-2: Esquema del fotobiorreactor propuesto

4.2.1 Comportamiento hidráulico del fotobiorreactor

Una vez realizado el modelo del fotobiorreactor se procedió al cálculo de la presión en diferentes puntos del receptor solar, para lo cual se utilizó la Ecuación 6. Se planteó la ecuación de la energía desde el punto A (ingreso al receptor solar) pasando por diferentes puntos hasta llegar al punto B (salida del receptor solar); la posición de cada punto se muestra en la Figura 4-3, teniendo como línea de referencia la base de la salida

2

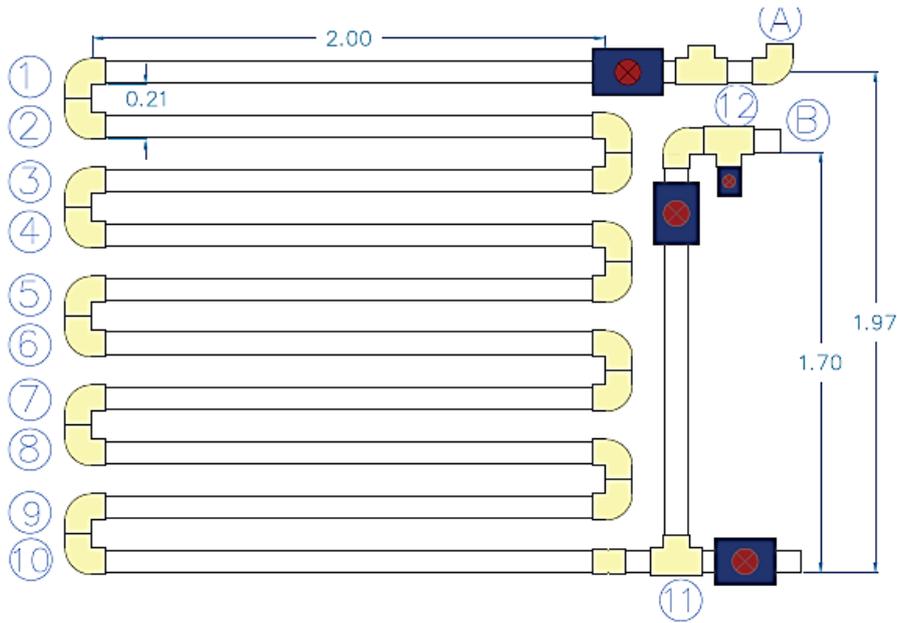


Figura 4-3: Puntos de análisis de la línea de energía hidráulica

Dado que se trabajó con la bomba peristáltica se calculó la presión para un caudal de circulación de 0.5 l/min:

Tabla 4-5: Cálculo de presión en distintos puntos del receptor solar, Q=0.5 l/min

Punto	Z (m)	L (m)	Hf (m)	Hl (m)	ΣHF (m)	P/γ (m)
A	1.98	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
1	1.97	2	4.06E-07	7.15E-06	7.22E-06	0.01
2	1.76	2	4.06E-07	7.66E-06	7.73E-06	0.22
3	1.55	6	1.22E-06	9.20E-06	1.01E-05	0.43
4	1.34	6	1.22E-06	9.71E-06	1.06E-05	0.64
5	1.13	10	2.03E-06	1.12E-05	1.29E-05	0.85
6	0.92	10	2.03E-06	1.18E-05	1.34E-05	1.06
7	0.71	14	2.84E-06	1.33E-05	1.58E-05	1.27
8	0.5	14	2.84E-06	1.38E-05	1.63E-05	1.48
9	0.29	18	3.65E-06	1.53E-05	1.86E-05	1.69
10	0.08	18	3.65E-06	1.58E-05	1.91E-05	1.90
11	0.08	20	4.06E-06	1.59E-05	1.96E-05	1.90
12	1.7	21.7	4.40E-06	2.32E-05	2.72E-05	0.28
B	1.7	22	4.46E-06	2.42E-05	2.83E-05	0.28



Una vez obtenida la presión se calculó la línea de altura motriz (LAM) en los distintos puntos de análisis:

Tabla 4-6: Cálculo de LAM en distintos puntos del receptor solar, Q=0.5 l/min

Punto	Z (m)	P/γ (m)	LAM (m)
A	1.98	0.00	1.980
1	1.97	0.01	1.980
2	1.76	0.22	1.980
3	1.55	0.43	1.980
4	1.34	0.64	1.980
5	1.13	0.85	1.980
6	0.92	1.06	1.980
7	0.71	1.27	1.980
8	0.50	1.48	1.980
9	0.29	1.69	1.980
10	0.08	1.90	1.980
11	0.08	1.90	1.980
12	1.70	0.28	1.980
B	1.70	0.28	1.980

Debido al bajo caudal de circulación se obtienen pérdidas despreciables por lo que el valor de la línea de altura motriz no varía, permaneciendo constante en todo momento en el receptor solar; además, se calculó la presión y la LAM para un caudal de 30 l/min en el caso que el fotobiorreactor se encuentre en funcionamiento con una bomba centrífuga:

Tabla 4-7: Cálculo de pérdidas y presión hidráulica en distintos puntos del receptor solar, Q=30 l/min

Punto	Z (m)	L (m)	Hf (m)	Hl (m)	ΣHF (m)	P/γ (m)
A	1.98	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
1	1.97	2	3.26E-04	5.75E-03	5.80E-03	0.00
2	1.76	2	3.26E-04	6.16E-03	6.21E-03	0.21
3	1.55	6	9.78E-04	7.39E-03	8.10E-03	0.42
4	1.34	6	9.78E-04	7.80E-03	8.51E-03	0.63



5	1.13	10	1.63E-03	9.04E-03	1.04E-02	0.84
6	0.92	10	1.63E-03	9.45E-03	1.08E-02	1.05
7	0.71	14	2.28E-03	1.07E-02	1.27E-02	1.26
8	0.50	14	2.28E-03	1.11E-02	1.31E-02	1.47
9	0.29	18	2.93E-03	1.23E-02	1.50E-02	1.68
10	0.08	18	2.93E-03	1.27E-02	1.54E-02	1.88
11	0.08	20	3.26E-03	1.28E-02	1.58E-02	1.88
12	1.70	21.7	3.54E-03	1.87E-02	2.19E-02	0.26
B	1.70	22	3.59E-03	1.95E-02	2.28E-02	0.26

A continuación, se calculó la LAM:

Tabla 4-8: Cálculo de LAM en distintos puntos del receptor solar, Q= 30 l/min

Punto	Z (m)	P/y (m)	LAM (m)
A	1.98	0.00	1.980
1	1.97	0.00	1.974
2	1.76	0.21	1.974
3	1.55	0.42	1.972
4	1.34	0.63	1.971
5	1.13	0.84	1.970
6	0.92	1.05	1.969
7	0.71	1.26	1.967
8	0.50	1.47	1.967
9	0.29	1.68	1.965
10	0.08	1.88	1.965
11	0.08	1.88	1.964
12	1.70	0.26	1.958
B	1.70	0.26	1.957

Se puede apreciar que las pérdidas totales son mínimas (2.28E-02 m) por lo que la LAM es siempre mayor que la altura del flujo (excepto en el punto A, donde $Z_A = LAM_A$), esto garantiza que el fluido circulará sin ningún inconveniente por el receptor solar.

4.2.2 Modos de Operación

4.2.2.1 Operación Continua

Para este modo de operación, las válvulas 1 y 3 deben estar abiertas y la válvula 2 cerrada; por la entrada 1 ingresa el agua residual sin tratar y por la entrada 2 el inóculo con microalgas que se mezcla dentro del receptor solar (Figura 4-4). Se debe tener un tanque de inoculación con las microalgas añadidas a un volumen de agua residual sin tratar durante al menos 1 día hasta que las microalgas puedan superar la fase de latencia y se adapten al medio para optimizar el tratamiento. El caudal con el que se agregan tanto el agua residual y el inóculo debe ser lo suficientemente bajo para permitir que el sustrato permanezca dentro del fotobiorreactor el tiempo suficiente hasta que se produzca el tratamiento.

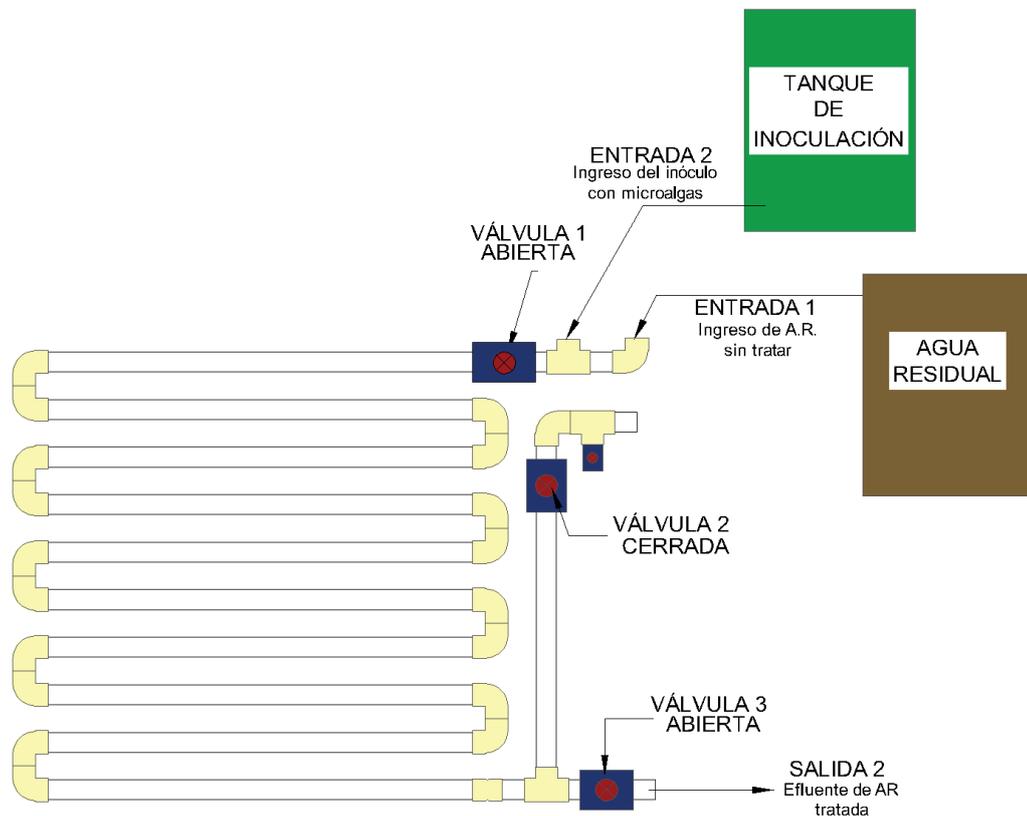


Figura 4-4: Configuración del fotobiorreactor para operación en modo continuo

En este modo, se esperó una menor eficiencia en el tratamiento y crecimiento de biomasa ya que no se resuelve el problema de la saturación crítica de oxígeno dentro del fotobiorreactor, y al circular el fluido con una velocidad tan baja se producirá sedimentación y acumulación celular dentro del mismo, lo cual fue un inconveniente para las labores de mantenimiento.

4.2.2.2 Operación en estado discontinuo o “Tipo Batch”

En este modo de operación, el agua recircula varias veces por el receptor solar, pasando por el tanque abierto y su sistema de aireación. Para operar de esta manera, las válvulas 1 y 2 deben estar abiertas y la válvula 3 cerrada; por la entrada 1 y 2 pueden ingresar tanto el inóculo como el agua residual u otros elementos necesarios para optimizar el proceso (Figura 4-5).

En este modo se puede prescindir del tanque de inoculación ya que la fase de latencia y adaptación al medio puede darse dentro del fotobiorreactor mientras está en circulación, pero aún se requiere del tanque abierto para el sistema de aireación y mezclado. Inicialmente se debe llenar con el agua residual y el inóculo tanto el receptor solar como el tanque abierto para tener un volumen constante que circule por el fotobiorreactor. La bomba impulsa el volumen del tanque a la entrada del receptor solar y desplaza al volumen que ya estaba dentro del fotobiorreactor hacia la salida 1 que debe estar conectada al tanque abierto y así producir una secuencia de circulación del flujo a través del fotobiorreactor. El compresor de aire debe estar conectado al tanque abierto para mejorar los procesos de mezclado e inyectar aire y CO₂ presente en el aire atmosférico que empuje al oxígeno disuelto saturado a escapar por la parte superior hacia la atmósfera. La válvula 4 permite tomar muestras del agua residual que circula por el fotobiorreactor sin parar el proceso y analizar la eficiencia en el tratamiento con distintos tiempos de retención.

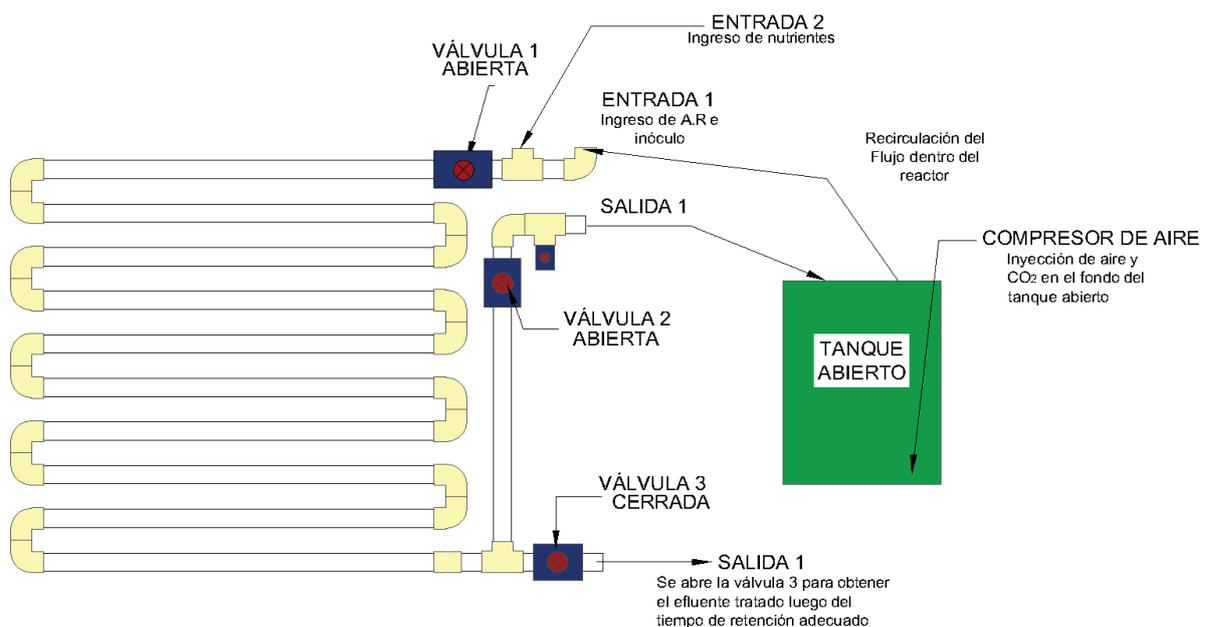


Figura 4-5: Configuración del fotobiorreactor para operación tipo Batch

4.3 Fotobiorreactor piloto

La construcción del receptor solar del fotobiorreactor se realizó en un taller de estructuras metálicas con la ayuda del personal del mismo; se realizaron las juntas entre los tubos de PEBD y los accesorios con pega para PVC, se dejó secar el tiempo especificado por el fabricante, se ajustó y aseguró sobre la estructura metálica de soporte para luego trasladarla a las instalaciones de la PTAR Ucubamba; tal como se observa en la Fotografía 4-1.



Fotografía 4-1: Construcción y traslado del fotobiorreactor piloto

4.3.1 Condiciones de operación del fotobiorreactor

Para realizar los ensayos de crecimiento de biomasa y de eficiencia en el tratamiento de aguas residuales, se operó el fotobiorreactor con una configuración tipo *Batch* y se trabajó con la bomba peristáltica y compresor de aire anteriormente descritos, con caudales máximos de 0.5 l/min y 160 l/min respectivamente (Fotografía 4-2).



Fotografía 4-2: Compresor de Aire y Bomba Peristáltica

Inicialmente se planteó utilizar la bomba centrífuga con caudal máximo de 30 l/min, sin embargo, en la etapa de pruebas de funcionamiento se presentaron problemas de atascamiento de la turbina debido a los lodos presentes en agua residual lo cual generó un fallo del equipo por sobrecalentamiento; ante estos inconvenientes, se decidió trabajar con la bomba peristáltica, que además de no tener contacto directo con el agua residual (evitando problemas de atascamiento), posee un sistema de programación para la configuración de los tiempos de funcionamiento.

Se programó la bomba peristáltica con un tiempo de encendido de 10 horas y un tiempo de apagado de 1 hora con un caudal de flujo de 0.5 l/min; con esta configuración cada ciclo de recirculación del agua residual en el fotobiorreactor tuvo una duración de alrededor de 4 horas y 15 minutos. Esta configuración se eligió en función de un tiempo considerable de funcionamiento y descanso de la bomba peristáltica.

Debido al bajo caudal de la bomba peristáltica, se presentaron problemas de sedimentación y asentamiento de partículas en el fondo de los tubos, además con estas condiciones se estima que los ciclos de luz/oscuridad y la eficiencia del mezclado se vieron disminuidos en alguna proporción.

El compresor de aire no presentó problemas en su funcionamiento, sin embargo, para evitar problemas de sobrecalentamiento se utilizó un temporizador mecánico con ciclos de encendido de media hora y tiempo de apagado de una hora y media. Los ciclos se determinaron en un esquema de ensayo y error sin afectar el funcionamiento esperado en los ensayos.



Se configuró el cronograma de pruebas para que todos los inicios de los períodos de operación del fotobiorreactor y muestreo de su efluente coincidan con los días de muestreo rutinario del agua residual tratada y sin tratar de la PTAR Ucubamba que se realizan los días lunes y miércoles. A pesar de la variación de la calidad del agua residual (tratada y sin tratar) a lo largo del mismo día, para propósitos del presente proyecto, se tomaron los valores de análisis de laboratorio de los muestreos de rutina de la PTAR Ucubamba como valores iniciales de comparación con el agua residual tratada en el fotobiorreactor.

4.3.2 Análisis del crecimiento de la biomasa en el fotobiorreactor

En primera instancia, se realizó una prueba para determinar el crecimiento de la biomasa dentro del fotobiorreactor operando con las condiciones descritas en el numeral anterior. A pesar de que en el ensayo de SSV pueden estar contenidos otros elementos (en cantidades muy pequeñas), para el propósito del presente estudio se consideró la densidad de SSV del agua residual como la densidad de biomasa presente en la misma.

Para iniciar el ensayo se tomó un volumen de 35 litros del agua residual tratada presente en las lagunas de maduración de la PTAR Ucubamba y se mezcló con un volumen de agua residual sin tratar hasta llenar por completo el fotobiorreactor. Además, se añadieron 50 gr de fertilizante compuesto NPK para mejorar el contenido de nutrientes del medio. Se estimó la densidad de SST y SSV inicial mediante una ponderación de los valores iniciales del agua residual del canal de ingreso y de la laguna de maduración del día 27/11/2017 (Anexo 1) tal como se muestra en la Tabla 4-9 y



Tabla 4-10.

Tabla 4-9: Caracterización de la mezcla de Agua residual cruda y tratada

Muestra	Volumen (l)	%
Canal de ingreso	153	0.81
Laguna de maduración	35	0.19



Tabla 4-10: Características iniciales y valor ponderado de SST y SSV – Día 27/11/2017

Parámetro (mg/l)	Canal de ingreso	Laguna de maduración	Valor ponderado
SST	77	29	68
SSV	65	27	58

Se operó el fotobiorreactor con la mezcla anteriormente descrita (sin reemplazarla) durante 7 días, realizando muestreos después de 1, 2, 3, 4 y 7 días desde el inicio del ensayo, y se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 4-6):

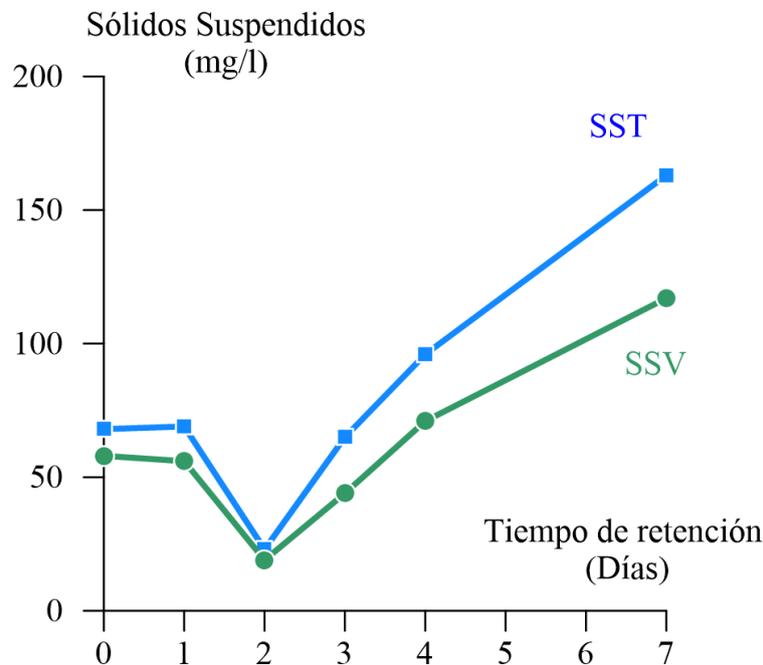


Figura 4-6: Crecimiento de la biomasa en el fotobiorreactor, desde 27/11/2017 al 04/12/2017

Se observa una disminución de la densidad de biomasa en los primeros días debido a la fase de latencia típica de la mayoría de especies de microalgas. Todos los organismos sufren un proceso de adaptación cuando cambian de ecosistema; en este caso, durante los primeros días las microalgas disminuyen su actividad y producen especies latentes capaces de sobrevivir en condiciones desfavorables; luego, las microalgas que sobrevivieron empiezan un nuevo proceso de desarrollo y pasan a una etapa de crecimiento exponencial, tal como se observa en la Figura 4-6. Debido a que no se trabajó con una especie separada de microalgas, no se amplió la ventana de muestreo a un rango que permita determinar la duración de las etapas de desarrollo de las

microalgas, sin embargo, con los datos obtenidos se puede concluir que, a pesar de la fase de latencia de 2 días, el desarrollo de la biomasa es favorable en las condiciones locales del presente estudio; en la Fotografía 4-3 se muestra el desarrollo de la biomasa en el fotobiorreactor verificable mediante inspección visual durante los 5 primeros días. En el Anexo 6 se muestran los resultados de laboratorio entregados por ETAPA.



Fotografía 4-3: Inspección visual del desarrollo de la biomasa en el fotobiorreactor

Desde 27/11/2017 al 04/12/2017

4.3.3 Análisis del efluente del fotobiorreactor

Se realizaron dos campañas de operación y muestreo del efluente para determinar el comportamiento del fotobiorreactor aplicado al tratamiento de aguas residuales; en la primera campaña, entre el 4 y el 8 de Diciembre del 2017, se realizaron dos períodos de prueba con tiempos de retención de 2 días; y en la segunda campaña, entre el 8 y el 25 de Enero del 2018 se realizaron dos períodos de prueba con tiempos de retención de 7 días; a continuación se presentan los resultados tabulados de los análisis de laboratorio



entregados por ETAPA (Tabla 4-11) en ambas campañas, que están reportados en el Anexo 8, Anexo 10, Anexo 12 y Anexo 14.

Tabla 4-11: Datos tabulados de los análisis de laboratorio del efluente del fotobiorreactor

Fecha de Muestreo	Tiempo de Retención (Días)	DBO (mg/l)	Coliformes totales (NMP /100ml)	Coliformes termotolerantes (NMP /100ml)	pH	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
04/12/2017	0	101	1.10E+07	7.00E+06	-	-	-
05/12/2017	1	115	7.80E+06	2.00E+06	-	-	-
06/12/2017	2	34	4.00E+05	**	-	-	-
06/12/2017	0	68	1.70E+07	9.40E+06	-	-	-
07/12/2017	1	40	4.90E+06	4.50E+05	-	-	-
08/12/2017	2	45	1.40E+05	6.10E+04	-	-	-
08/01/2018	0	98	4.90E+07	7.90E+06	6.74	-	-
12/01/2018	3	41	5.40E+05	3.50E+04	10.77	280	220
15/01/2018	5	26	1.10E+04	3.30E+03	11.18	-	-
17/01/2018	7	20	**	**	11.27	50	50
17/01/2018	0	91	7.00E+06*	4.90E+06*	7.6*	-	-
19/01/2018	3	19	1.70E+03	2.00E+02	11.89	29	27
22/01/2018	5	15	4.90E+03	1.30E+03	11.8	32	30
25/01/2018	7	21	**	**	11.9	46	46

Nota: ** Indica ausencia de coliformes en la muestra; - indica que no se realizó el análisis; los valores con * se obtuvieron realizando un promedio de los resultados de laboratorio de las fechas 15/01/2017 y 22/01/2017 dado que no se obtuvieron los datos de esa fecha en los muestreos de rutina de la PTAR Ucubamba.

4.3.3.1 Resultados obtenidos del primer período de pruebas

Tabla 4-12: Especificaciones del primer período de pruebas

Inicio	Lunes 04/12/2017
Fin	Miércoles 06/12/2017
Volumen total	128 l (receptor solar) + 60 l (tanque)
Inóculo	30 litros de agua residual cruda mezclada con agua residual tratada de las lagunas de maduración con adición externa de nutrientes (fertilizante NPK), procesada en el fotobiorreactor durante los 7 días previos al inicio del período de pruebas para permitir el desarrollo de la biomasa, con una densidad de SSV 113 mg/l.



Variables de control	DBO ₅ , coliformes totales, coliformes termotolerantes.
Agua residual cruda	Obtenida del canal de ingreso de la PTAR Ucubamba el 04/11/2017 cuya caracterización se presenta en el reporte de los análisis rutinarios de la PTAR (Anexo 7).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación de manera gráfica en la Figura 4-7 y se reportan en el Anexo 8 los documentos entregados por los laboratorios de ETAPA.

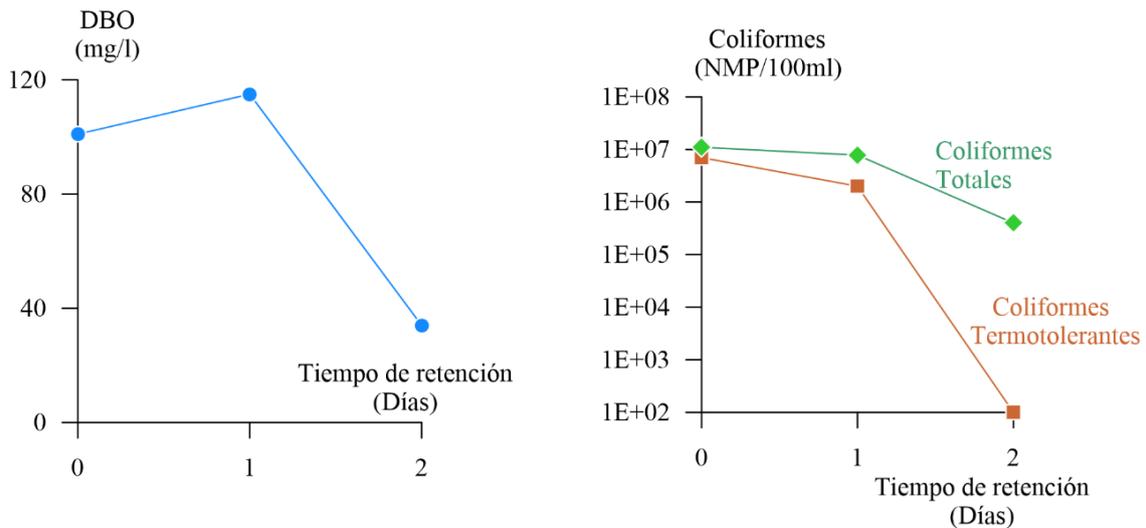


Figura 4-7: Resultados del primer período de pruebas

El agua residual cruda en el día del inicio de la prueba se presenta con características similares a las de la media estadística presentada en la Tabla 2-1, con un valor de DBO muy cercano al límite normado. Se cree que la biomasa presenta una ligera fase de adaptación al medio de cultivo en el primer día de tratamiento, en donde la DBO aumenta ligeramente y la inactivación de coliformes (totales y termotolerantes) se presenta a una tasa menor que al segundo día debido a la baja actividad fotosintética y reproductiva de las microalgas. En el segundo día de tratamiento se observa que las microalgas superan la fase de adaptación y el proceso de tratamiento mejora, disminuyendo considerablemente la DBO e inactivando una cantidad considerable de coliformes con una disminución de 2 unidades logarítmicas en coliformes totales y reportando una inactivación de coliformes termotolerantes hasta no producir crecimiento en la dilución sembrada en el análisis de laboratorio reportado por ETAPA; sin embargo esta inactivación total de los coliformes termotolerantes está fuera de la tendencia obtenida en los otros ensayos de los períodos de prueba posteriores.



De este ensayo se debe destacar que el comportamiento del fotobiorreactor con un inóculo procesado durante 7 días previos es prometedor; la disminución de DBO y coliformes es considerable con un tiempo de retención de 2 días (menor a los valores establecidos en la normativa presentada en la Tabla 3-5 y el Anexo 2) y se puede asumir que la biomasa se presenta con una densidad estable debido al tiempo de adaptación previo en un medio de características similares.

4.3.3.2 Resultados obtenidos del segundo período de pruebas

Tabla 4-13: Especificaciones del segundo período de pruebas

Inicio	Miércoles 06/12/2017
Fin	Viernes 08/12/2017
Volumen total	128 l (receptor solar) + 60 l (tanque)
Inóculo	30 litros del efluente del fotobiorreactor al final del primer período de pruebas. No se registraron datos de la densidad de SSV.
VARIABLES de control	DBO ₅ , coliformes totales, coliformes termotolerantes.
Agua residual cruda	Obtenida del canal de ingreso de la PTAR Ucubamba el 06/11/2017 cuya caracterización se presenta en el reporte de los análisis rutinarios de la PTAR (Anexo 9).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación de manera gráfica en la Figura 4-8 y se reportan en el Anexo 10 los documentos entregados por los laboratorios de ETAPA.

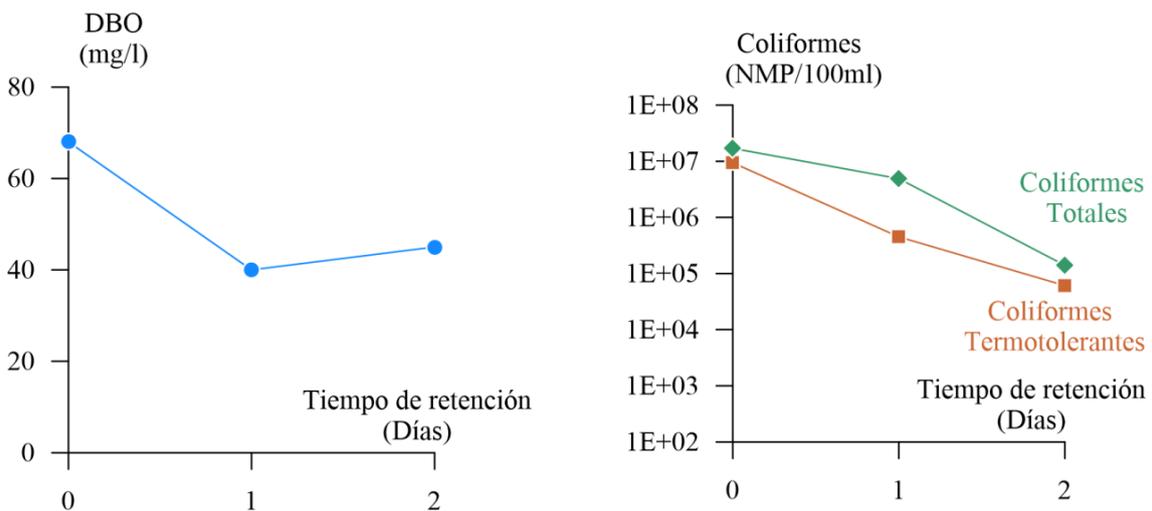


Figura 4-8: Resultados del segundo período de pruebas

El agua residual cruda utilizada en esta prueba también presenta características similares a la del registro histórico del Anexo 1; inicialmente tiene un requerimiento de DBO



menor al del primer período de pruebas, además está por debajo del límite establecido por la normativa (Anexo 2).

La biomasa utilizada en la inoculación en este período fue procesada durante 9 días en total (7 días previos al primer período de pruebas y 2 días en el primer período mismo) por lo que presenta mayor estabilidad, lo cual se ve reflejado en la disminución instantánea de la DBO y los coliformes en el primer día de tratamiento; sin embargo, entre los días 2 y 3 del período de pruebas (entre el 7 y 8 de Diciembre del 2017) la bomba peristáltica dejó de funcionar repentinamente por lo que el agua residual no recirculó por el fotobiorreactor y el proceso de tratamiento se vio afectado, como lo demuestran el incremento de la DBO y la disminución de la tasa de inactivación de coliformes totales y termotolerantes comparada con los resultados obtenidos en el primer período de pruebas. En este ensayo, con 2 días de tratamiento la DBO disminuye a un valor por debajo de la normativa (Tabla 3-5 y Anexo 2) pero los coliformes termotolerantes aún están 1 unidad logarítmica por encima del valor normado, lo cual como se explicó anteriormente puede deberse a la parada de la bomba e interrupción del proceso de tratamiento del agua residual en el fotobiorreactor.

4.3.3.3 Resultados obtenidos del tercer período de pruebas

Tabla 4-14: Especificaciones del tercer período de pruebas

Inicio	Miércoles 10/01/2018
Fin	Miércoles 17/01/2018
Volumen total	128 l (receptor solar) + 60 l (tanque)
Inóculo	30 litros de agua residual cruda mezclada con agua residual tratada de las lagunas de maduración con adición externa de nutrientes (fertilizante NPK), procesada en el fotobiorreactor durante los 7 días previos al inicio del período de pruebas para permitir el desarrollo de la biomasa. No se registraron datos de densidad de SSV.
VARIABLES DE CONTROL	DBO ₅ , coliformes totales, coliformes termotolerantes, pH, SSV y SST.
Agua residual cruda	Obtenida del canal de ingreso de la PTAR Ucubamba el 06/11/2017 cuya caracterización se presenta en el reporte de los análisis rutinarios de la PTAR (Anexo 11).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación de manera gráfica en la Figura 4-9 y se reportan en el Anexo 12 los documentos entregados por los laboratorios de ETAPA y se presentan fotografías de los días de muestreo en el Anexo 16.

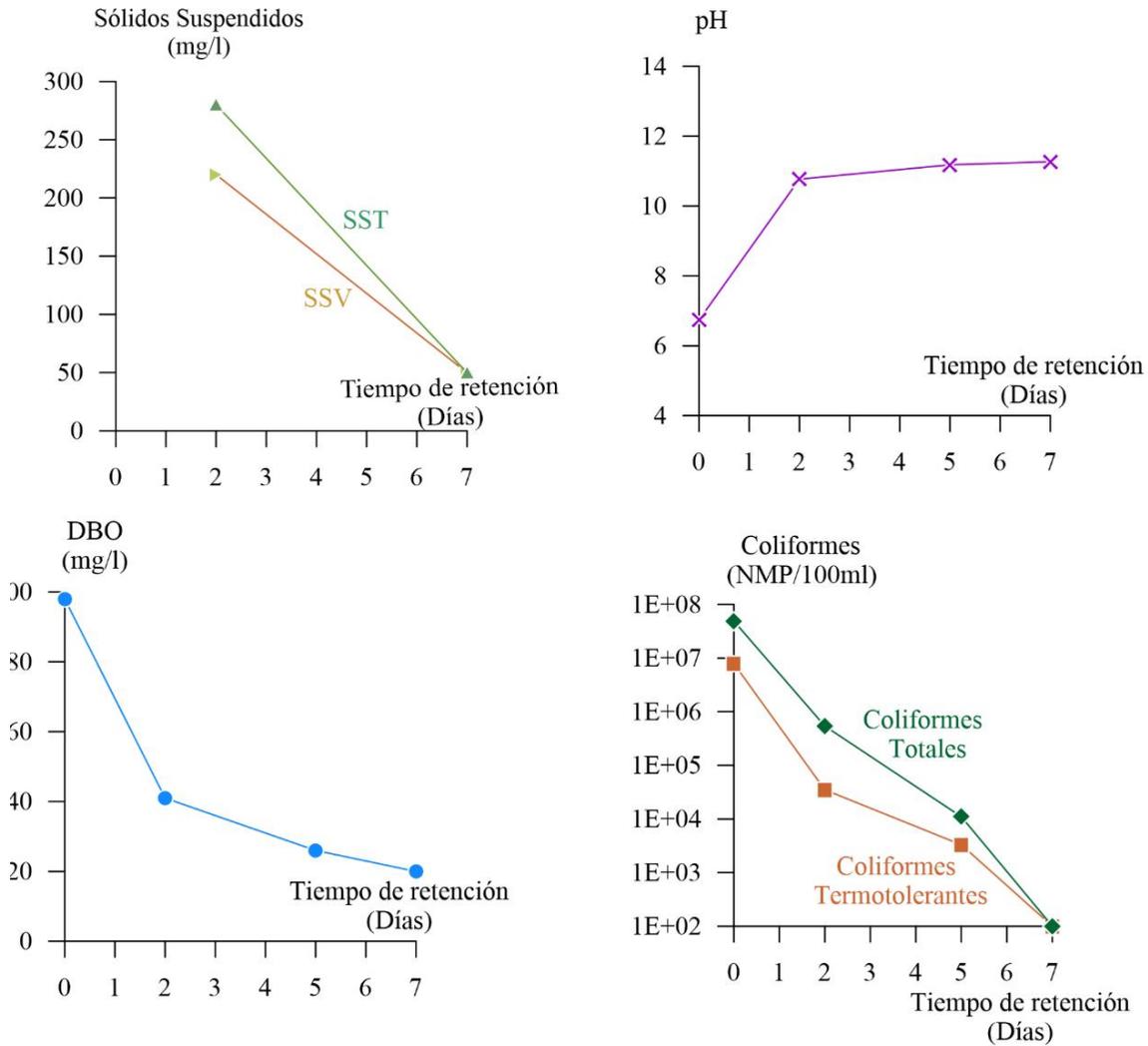


Figura 4-9: Resultados del tercer período de pruebas

En este punto no se consideran los efectos de la fase de adaptación de las microalgas al agua residual nueva debido a que el período de pruebas fue más largo y los muestreos más espaciados. Se observa que la biomasa entró en la fase de declinación debido a la falta de nutrientes, poca disponibilidad de CO₂ y aumento de pH del medio (valor cercano a 12, mientras que las microalgas necesitan ambientes con pH entre 7 y 9); adicionalmente, se debe mencionar que debido a los efectos de sedimentación presentados en los anteriores períodos de prueba se formaron películas de biomasa que se pegaron a las paredes de las tuberías, lo cual genera efectos de sombreado sobre el receptor solar tal como se muestra en la Fotografía 4-4, lo cual también afecta al crecimiento de la biomasa.



Fotografía 4-4: Película de biomasa pegada a las paredes de las tuberías del receptor solar

En cultivos con densidades celulares altas, el pH aumenta debido a la acción misma de las microalgas (intensa actividad fotosintética) y por lo general es corregido con un sistema de aireación enriquecido con CO₂. En este proyecto no se instaló una estación de suministro de CO₂ para controlar el pH del medio y por ello los resultados reflejan un descenso considerable de la densidad de SSV. A pesar de la disminución de la biomasa, la actividad fotosintética sigue efectuándose (y el compresor de aire sigue inyectando oxígeno al agua residual) y la DBO disminuye durante el proceso de tratamiento al mismo tiempo que se inactivan los coliformes totales y termotolerantes (también por efecto del pH alcalino) hasta presentar a los 7 días una inactivación total que no produzca crecimiento en las diluciones sembradas en los análisis de laboratorio y una DBO de alrededor de 20 mg/l, que son valores muy por debajo de la normativa. En este punto, si se logra optimizar el fotobiorreactor para que el efluente cumpla con los parámetros de calidad establecidos en la normativa, se podría utilizar el agua residual tratada como agua para uso agrícola.

4.3.3.4 Resultados obtenidos el cuarto período de pruebas

Tabla 4-15: Especificaciones del cuarto período de pruebas

Inicio	Miércoles 17/01/2018
Fin	Miércoles 24/01/2018
Volumen total	128 l (receptor solar) + 60 l (tanque)
Inóculo	30 litros del efluente del fotobiorreactor al final del tercer período de pruebas. No se añadieron nutrientes externos.
Variables de control	DBO ₅ , coliformes totales, coliformes termotolerantes, pH, SSV y SST.
Agua residual cruda	Obtenida del canal de ingreso de la PTAR Ucubamba el 06/11/2017 cuya caracterización se presenta en el reporte de los análisis rutinarios de la PTAR (Anexo 13).



Los resultados obtenidos se presentan a continuación de manera gráfica en la Figura 4-10 y se reportan en el Anexo 14 los documentos entregados por los laboratorios de ETAPA.

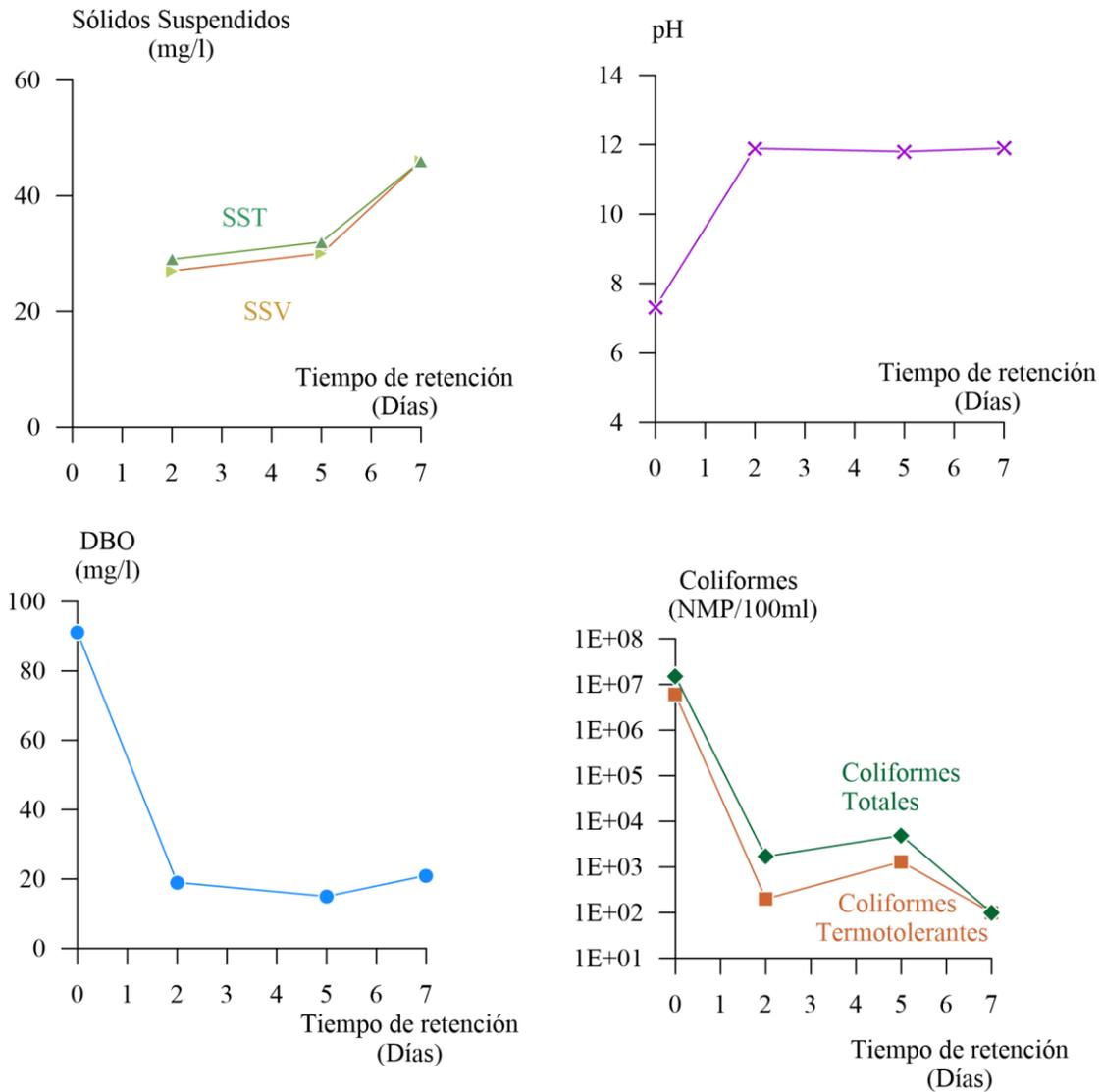


Figura 4-10: Resultados del cuarto período de pruebas

Se puede observar que en este período de pruebas no hubo un incremento considerable de la biomasa; de hecho, según el reporte de los muestreos rutinarios de la PTAR Ucubamba, el agua residual cruda presentó una densidad de SSV mayor a la del inóculo utilizado en este período de pruebas. No se reportan análisis de laboratorio en el día 17/01/2018 para determinar el contenido de nutrientes del agua residual cruda, pero históricamente el afluente de la PTAR Ucubamba siempre ha presentado niveles bajos de nutrientes; lo cual, sumado al pH elevado del medio en el inóculo (las microalgas

estaban en fase de declinación), no permitió un crecimiento correcto de la biomasa (se presentó un crecimiento muy pobre en el período de pruebas) a pesar de que la misma fue introducida en nuevo medio y debía empezar un nuevo ciclo de desarrollo. En el estudio realizado por Wang et al. (2010) se reporta que un inóculo con una densidad celular de 50mg/l es suficiente para lograr el desarrollo de la biomasa en un nuevo medio; sin embargo, en este caso no se trabajó con una especie separada de microalga (sino con una mezcla de la biomasa presente en las lagunas de maduración, en la cual es probable que algunas especies produjeran sustancias inhibitorias para otras especies), la cantidad de nutrientes en el agua residual característica del afluente de la PTAR es baja (sin añadir nutrientes externos) y se presentaron los mismos problemas del tercer período de pruebas con los efectos de sombreado que se muestran en la Fotografía 4-4 y Fotografía 4-5. La introducción de nutrientes en la primera fase de desarrollo de la biomasa algar demostró ser eficaz cuando el agua residual a tratar tiene alta dilución y baja concentración de nutrientes como la encontrada en Ucubamba.



Fotografía 4-5: Efectos de sombreado en el receptor solar durante el cuarto período de pruebas y obstrucción de la manguera de la bomba peristáltica

El pH del agua residual tratada aumenta y tiende a estabilizarse alrededor de 12 debido a los factores ya descritos en el tercer periodo de pruebas. La DBO disminuye durante el proceso de tratamiento al mismo tiempo que se inactivan los coliformes totales y termotolerantes hasta presentar a los 7 días una inactivación total que no produzca crecimiento en las diluciones sembradas en los análisis de laboratorio. En este ensayo se observa que, a pesar del bajo desarrollo de biomasa, el proceso de tratamiento del agua residual continúa de manera eficiente debido al aporte del compresor de aire como método de aireación, a los efectos de desinfectantes de la radiación solar y la



alcalinización del medio. Cabe indicar que al quinto día se apagó la bomba por lo que se detuvo la recirculación; esto produjo un incremento aproximado de una unidad logarítmica tanto en los coliformes totales como en los termotolerantes y probablemente haya producido el pequeño incremento de la DBO a los 7 días.

4.3.3.5 Análisis general de resultados

En general, en todas las pruebas realizadas se han obtenido resultados muy positivos y prometedores en cuanto al tratamiento del agua residual esperado. No se planteó una metodología fija para los ensayos por lo tanto no se pueden comparar los resultados entre los períodos de pruebas, sin embargo, esto ha permitido probar el fotobiorreactor en distintos escenarios y llegar a la conclusión de que es un sistema muy eficiente para el tratamiento de aguas residuales, ya que en todos los ensayos se obtuvieron disminuciones considerables de las concentraciones de materia orgánica y patógenos del agua, representadas en las variables de control establecidas, que son los contaminantes más importantes en nuestro medio para cuidar la salud pública y ambiental.

En el tercer y cuarto período de pruebas se obtuvieron resultados que permiten establecer que, con las condiciones de operación aplicadas en este proyecto, el pH aumenta rápidamente y tiende a estabilizarse en un valor cercano a 12. Este pH alcalino altera las condiciones del medio y ayuda a la inactivación de los microorganismos patógenos, pero también afecta al desarrollo de las microalgas (que necesita un pH neutro para su desarrollo óptimo) por lo cual, la implementación de un sistema de suministro de CO₂ puede ser una alternativa para mejorar la producción de biomasa.

En los primeros ensayos se obtuvieron mejores resultados de desarrollo de biomasa debido a que las tuberías del fotobiorreactor se encontraban menos obstruidas (por la misma biomasa pegada a las paredes); este factor resulta ser inconveniente importante, ya que el mantenimiento y limpieza de los elementos del fotobiorreactor acarrea un peligro biológico considerable.

Los resultados obtenidos con tiempos de retención de 48 horas en adelante son muy prometedores ya que se logra disminuir varios contaminantes a niveles por debajo de la normativa en un tiempo de retención factible, sin embargo se debería profundizar esta investigación para optimizar el funcionamiento del fotobiorreactor con especies separadas de microalgas y añadir módulos adicionales que permitan controlar las variaciones de pH, sólidos suspendidos (totales y volátiles) y demás características



necesarias para cumplir los requerimientos establecidos por la normativa para reutilizar el efluente como agua de uso agrícola.

4.3.4 Viabilidad tecnológica y operacional de fotobiorreactores

Este tipo de sistemas tienen un mejor desempeño en regiones del planeta en donde se registran altos índices de radiación solar y temperatura. A pesar de que no es el objetivo principal del presente proyecto, la sustentabilidad económica representa un punto vital a la hora de escalar estos sistemas. Se debe buscar a un equilibrio energético entre los requerimientos para la operación del fotobiorreactor y los recursos obtenidos del mismo (biomasa aplicable en otras industrias); en este aspecto, los fotobiorreactores tubulares permiten alcanzar cosechas de microalgas con densidades muy superiores a las de los sistemas lagunares (los más comunes) (Ometto et al., 2014). Los procesos de recuperación de biomasa más efectivos resultan inaccesibles para sistemas descentralizados por lo que se ha propuesto la floculación y posterior sedimentación como método de cultivo debido a que resulta ser la más simple de las alternativas, sin embargo, las tasas de recuperación de biomasa son bastante menores y se deberá realizar un análisis de costo y beneficio para determinar la factibilidad económica en este tipo de sistemas.

Aplicando un sistema de floculación, se propone la adición de un floculante natural para mantener el proceso amigable con el medio ambiente; el Quitosano y el almidón catiónico han sido propuestos por Rashid et al. (2013) y Vandamme et al. (2010) debido a sus características biodegradables y bajo costo; en una relación de 60 kg/l de Quitosano y 20 kg/l de almidón catiónico se han reportado índices de recuperación de biomasa cercanos al 80%. Solo resta verificar dichos porcentajes de recuperación en ensayos de campo en las condiciones locales y aprovechar el contenido de biomasa en aplicaciones para otras industrias.

En el presente estudio, no se realizaron pruebas para determinar el porcentaje de recuperación de biomasa con la metodología anteriormente planteada debido a que no se trabajó con especies separadas de microalgas y la recuperación de dicha biomasa no tendría aplicación alguna.



4.3.4.1 Aplicación en sistemas familiares y condominiales

Una vez diseñado el fotobiorreactor y realizado el análisis la efectividad de tratamiento de las aguas residuales se procedió a una estimación de la aplicabilidad de este fotobiorreactor para tratar los efluentes domésticos de hogares tipo.

Dado que el proyecto está destinado para poblaciones rurales y que está diseñado a escala piloto se establece una dotación de 20 l/hab/día, valor mínimo para servicios de accesos básicos recomendado por la organización mundial de la salud (OMS, 2006). Además, se estableció un factor de retorno igual a 1 por lo que el caudal de ingreso al fotobiorreactor será los mismos 20 l/hab/día. Conocido el caudal de ingreso y el volumen del fotobiorreactor (128 l) se procede al cálculo del número de personas que puede servir:

Tabla 4-16: Número de personas a servir en función del tiempo de retención

Tiempo de retención (horas)	Volumen acumulado (l/hab)	# personas servidas
12	10	13
24	20	6
48	40	3
72	60	2

Dado que el afluente del fotobiorreactor comienza a mostrar mejoras de la calidad del agua desde tiempos de retención de 2 días, se estima que puede servir sin ningún inconveniente un hogar de 3 personas. Sin embargo, una familia común en áreas rurales esta alrededor es de 4 personas por lo cual se procede a calcular un tiempo de retención para este caso:

Tabla 4-17: Tiempo de retención para una familia de 4 personas

# Personas	Q diario (l/día)	T retención (horas)
4	80	38

Con los resultados obtenidos se observa que el fotobiorreactor puede servir de manera óptima a una familia (3 - 4 personas) con un tiempo de retención de 2 días. Esto nos indica que para el uso en un sistema condominial el fotobiorreactor no va lograr servir a todas las familias dado que se requiere construir un fotobiorreactor por familia o reducir el tiempo de retención. Al reducir el tiempo de retención se reduce la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales, por lo que una alternativa para solucionar este problema sería la construcción de más fotobiorreactores. Lo ideal sería la colocación de



varios fotobiorreactores en serie funcionando como uno solo, sin embargo, esto llevara a requerir de un mayor espacio de terreno en planta y además esto impediría la recirculación de flujo por lo que el fotobiorreactor tendría un funcionamiento continuo. Otra alternativa para evitar la construcción la fotobiorreactores en serie es la construcción de un fotobiorreactor de mayor longitud, conectando tuberías mediante uniones, reduciendo de esta manera el gasto en accesorios (codos y válvulas de control). Sin embargo, se requiere de una estructura de soporte de mayor tamaño, ante lo cual se podría simplificar la configuración del receptor solar sujetándolo con una estructura con inclinación fija y reducir los costos en comparación con la construcción de varias estructuras por separado. Para llegar a este punto se recomienda realizar un estudio a profundidad para determinar la inclinación óptima de la estructura de soporte del receptor solar.

Para fines prácticos, una dotación de 20 l/hab/día es irreal en nuestro medio, se considera que una dotación de 100 l/hab/día para un nivel de servicio de acceso óptimo (OMS, 2006) tiene más sentido. Con este valor, para una familia de 4 personas y un tiempo de retención de 2 días, se requeriría escalar el fotobiorreactor en una escala de volumen de 6 veces comparado al fotobiorreactor estudiado en este proyecto.

Si se optimiza el funcionamiento del fotobiorreactor para disminuir los coliformes a un valor menor a 1000 NMP/100ml manteniendo un pH entre 6 y 9, se podría utilizar el efluente del mismo para fines de uso agrícola según los límites establecidos en la Tabla 6: Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola (Anexo 3), y Tabla 7: Parámetros de los niveles guía de la calidad del agua para riego, de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, Libro VI, Anexo I para el Ecuador (Anexo 4).

Finalmente se procede a calcular el costo de la tarifa eléctrica por el funcionamiento del fotobiorreactor. Conocido el costo del kilowatt hora (kWh) de 0.04\$ y conocida las potencias de los equipos se calcula el costo del fotobiorreactor para un mes de funcionamiento



Tabla 4-18. Consumo energético de los equipos utilizados

Equipo	Potencia(kW)	Tiempo de uso por día (horas)	Costo por día (\$)	Costo por mes (\$)
Bomba	0.37	24	0.36	10.66
Compresor de aire	0.135	12	0.06	1.94
			Total	12.60



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio de los muestreos del efluente del fotobiorreactor en todos los períodos de prueba realizados, se concluye que efectivamente se aplicó un tratamiento al agua residual cruda (proveniente del canal de ingreso de la PTAR Ucubamba) que disminuyó sustancialmente sus características contaminantes. La reducción de la demanda bioquímica de oxígeno y del conteo de coliformes termotolerantes (fecales) ha resultado satisfactoria; en el tercer y cuarto período de pruebas a los 5 días de tratamiento se obtuvieron valores de los parámetros antes mencionados menores a los de la normativa citada en este estudio (Anexo 2). Se presume que a más de la actividad de la biomasa en el agua residual, existe un aporte considerable de los demás elementos del fotobiorreactor: (a) la luz solar a más de ser una fuente de energía lumínica para la biomasa, aporta al tratamiento un proceso de desinfección debido a la radiación ultravioleta y al pequeño porcentaje de incremento de temperatura; (b) el compresor de aire conectado al tanque abierto, a más de inyectar una pequeña cantidad de CO₂, funciona prácticamente como un dispositivo aireador en el fotobiorreactor y apoya en las labores de disminución de la DBO.

Sin embargo, se aprecia por simple inspección visual que el color del agua residual tratada está fuera de la normativa, lo cual debe a la ausencia de un proceso de recuperación de la biomasa al final del período de tratamiento; por ello, se recomienda implementar en investigaciones futuras algún mecanismo de recuperación de la biomasa y verificar si existe una mejora de las características físicas del agua residual tratada. Así también, la recolección de biomasa algar contribuirá a aminorar la concentración de DBO total en el efluente final.

En este estudio, debido a las características de la bomba utilizada, no se lograron las condiciones óptimas de trabajo para el fotobiorreactor. Esta situación, sumada a la caracterización propia del agua residual del afluente de la PTAR Ucubamba y al hecho de que no se trabajó con especies separadas de microalgas, ha disminuido significativamente el desarrollo de la biomasa. Se esperaba obtener un cultivo de alta densidad celular, pero los valores de sólidos suspendidos volátiles en todos los ensayos (a pesar de la adición de nutrientes externos) estuvieron muy por debajo del rango típico de este tipo de cultivos. Según varios autores citados en la revisión bibliográfica, los



cultivos de alta densidad celular deben alcanzar una densidad cercana a 3000 mg/l y en el presente estudio la máxima obtenida fue menor a 300 mg/l en los primeros ensayos, en donde aún no existían problemas de sedimentación y fijación de la biomasa en las paredes de las tuberías (lo que acarrea problemas de sombreado). El aumento considerable del pH es uno de los factores que se considera influyó en forma significativa al desarrollo menor al esperado de la concentración de biomasa en el reactor, por lo que es de vital importancia adicionar un sistema de suministro de CO₂ que permita controlar dicho parámetro.

Con los resultados obtenidos del pH en los 2 últimos períodos de prueba, se concluye que existió una alta actividad fotosintética y además una insuficiencia de CO₂ lo cual ha obstaculizado el desarrollo de microorganismos patógenos en el agua residual pero también afectó al desarrollo normal de la biomasa impidiendo alcanzar densidades mayores.

Se considera que el proceso de tratamiento puede mejorar (y disminuir el tiempo de retención) si se trabaja con especies separadas de microalgas, especialmente con las especies *Chlorella* y *Scenedesmus*; que, según investigaciones anteriores (Park et al., 2011; Tam & Wong, 1989; Wang et al., 2010), presentaron comportamientos prometedores en el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, en la bibliografía revisada, los investigadores habían desarrollado el inóculo en un laboratorio con sustratos distintos al agua residual; la mayoría coinciden en que el agua residual no resulta un medio óptimo para el cultivo de varias especies de microalgas. En este sentido, y en función de los resultados obtenidos, se cree que el proceso puede mejorar si se prepara el inóculo en condiciones de laboratorio logrando un alta densidad celular de microalgas y añadiendo el mismo en un tanque de inoculación previo al fotobiorreactor para permitir que las microalgas se adapten al medio (agua residual con características similares a la que aplicará el tratamiento), superen la fase de latencia y entonces ingresen al fotobiorreactor para aplicar el tratamiento del agua residual cuando se encuentren en fase de crecimiento exponencial.

En todos los ensayos se operó el fotobiorreactor en modo *Batch* para aumentar los tiempos de retención del agua residual en el mismo, sin embargo el fotobiorreactor puede configurarse para trabajar en modo continuo, pero para ello se deberá aumentar la densidad del inóculo de la biomasa (que deberá ingresar junto con el agua residual en cada período de tratamiento) a una densidad que permita mejorar la eficiencia del



tratamiento a tal punto que con tiempos de retención mucho más cortos se logre una descontaminación considerable. Otra alternativa es combinar el fotobiorreactor como un proceso de tratamiento terciario, en donde las dos primeras etapas se realicen con otros sistemas de tratamiento, pero ésta configuración podría resultar inaccesible para sistemas descentralizados familiares, pero abre una oportunidad para sistemas condominiales o inclusive pequeñas plantas para comunidades pequeñas.

Es evidente que el mantenimiento de los elementos del fotobiorreactor (equipos, mangueras, tuberías, accesorios) acarrea un peligro biológico considerable, por lo que para la implementación del sistema se requerirá de un equipo de personas encargadas de dichas labores para prolongar la vida útil del mismo y mantener las mejores condiciones de funcionamiento. Para futuras investigaciones con el mismo prototipo se recomienda limpiar las tuberías y accesorios del fotobiorreactor al término de cada prueba para evitar el deterioro de los materiales, obstrucción de las mangueras de la bomba y fijación de la biomasa a las paredes de las tuberías para mantener las mejores condiciones de funcionamiento del fotobiorreactor.

Se recomienda que en investigaciones futuras se realicen pruebas del fotobiorreactor en condiciones más desfavorables (operación y condiciones ambientales) para determinar valores críticos de funcionamiento y establecer mecanismos de control de calidad y barreras de protección que eviten la contaminación de ambientes cercanos. Además, se recomienda añadir más módulos al fotobiorreactor para tener un mejor control de las variaciones de pH, controlar la cantidad de sólidos suspendidos en el efluente y realizar otras mediciones para determinar la viabilidad de la reutilización del efluente del fotobiorreactor como agua para uso agrícola.

No se realizaron pruebas para medir la cantidad de biomasa que se puede recuperar después del tratamiento debido a que no se trabajó con una especie separada de microalgas; se espera que en el futuro se desarrolle esta parte de la investigación implementando una estación de recuperación de biomasa con la aplicación del proceso de floculación recomendado en el marco teórico del presente estudio (adición de Quitosano y almidón catiónico) y comprobando los porcentajes de recuperación con el mismo método reportados en investigaciones pasadas.

Durante la ejecución de este proyecto, se han constatado los efectos desgastantes de las aguas residuales sobre los elementos del fotobiorreactor que estuvieron en constante



contacto con las mismas, especialmente en las mangueras de la bomba peristáltica y del compresor de aire. En el período de ensayos previos a las pruebas presentadas en este estudio, se utilizó una bomba hidráulica centrífuga para la recirculación del agua residual pero al poco tiempo se presentaron problemas de atrancamiento de la turbina y sobrecalentamiento del equipo debido a los lodos propios de las aguas residuales y por ello se decidió trabajar con la bomba peristáltica, que a pesar de presentar inconvenientes debido su bajo caudal, nos permitió realizar la operación y pruebas del fotobiorreactor.

La aplicación de fotobiorreactores tubulares cerrados se presenta finalmente como una alternativa ambientalmente factible; sin embargo, a pesar de que no se realizó un análisis de costos, es evidente que este sistema no es económico debido a los materiales, equipamiento y mano de obra requeridos. En comparación con otras alternativas disponibles en el mercado para tratamientos de efluentes de hogares, esta alternativa puede resultar competitiva considerando que el efluente garantiza un reúso del efluente, lo que no es viable con otras opciones como tanques sépticos o los llamados biodigestores compactos. Proyectos similares a éste, se han enfocado en diseñar procesos para obtener cultivos de muy altas densidades de especies de microalgas con aplicaciones útiles en otras industrias (alimenticia, farmacéutica, energética, entre otras), pero la recuperación de la biomasa siempre ha sido la parte que afecta notablemente la eficiencia del proceso. A pesar de que en investigaciones realizadas en otras partes del planeta se reporta que los mecanismos más efectivos de cosecha y aprovechamiento de las microalgas son demasiado costosos en relación con el beneficio obtenido por la misma, se recomienda realizar un estudio económico en el medio local considerando el escalamiento del prototipo y determinar la relación real entre el costo final y la eficiencia del tratamiento.



6 REFERENCIAS

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Acher, A., Fischer, E., Turnheim, R., & Manor, Y. (1997). Ecologically friendly wastewater disinfection techniques. *Water Research*, 31(6), 1398–1404.
- Acher, A. J., Fischer, E., & Manor, Y. (1994). Sunlight disinfection of domestic effluents for agricultural use. *Water Research*, 28(5), 1153–1160.
- Alvarado, A. (2013). *Advanced dynamic modelling of wastewater treatment ponds*. Ghent University.
- Alvarado, A., Larriva, J., Sánchez, E., Idrovo, D., & Cisneros, J. F. (2017). Assessment of decentralized wastewater treatment systems in the rural area of Cuenca, Ecuador. *Water Practice and Technology*, 12(1), 240–249.
- Arnáiz-Franco, C., Isac Oria, L., & Lebrato Martínez, J. (2000). Determinación de la biomasa en procesos biológicos. I Métodos directos e indirectos. *Tecnología Del Agua*, 20(205), 45–52.
- Bain, M. B., & Stevenson, N. J. (1999). Aquatic habitat assessment. *Bethesda, Maryland: American Fisheries Society*, 1–216.
- Barona, A. C. (2014). *Determinación del potencial antimicrobiano de la microalga Chlorella extraída de las aguas empozadas de las acequias de Atocha, Tilulum y el Socavón del cantón Ambato*. Universidad Técnica de Ambato.
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. CRC press.
- Blair, M. F., Kokabian, B., & Gude, V. G. (2014). Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 665–674.
- Brandi, G., Sisti, M., & Amagliani, G. (2000). Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems. *Journal of Applied Microbiology*, 88(5), 845–852.



- Brentner, L., Peccia, J., & Zimmerman, J. (2010). Challenges in developing biohydrogen as a sustainable energy source: implications for a research agenda. *Environmental Science Technology*, 44, 2243–2254.
- Brungs, W. A. (1973). Effects of residual chlorine on aquatic life. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 2180–2193.
- Cabrera, M. A., & Pulla, M. F. (2014). *Linea base para el aprovechamiento de microalgas de sistemas de tratamiento de agua residual*. Universidad de Cuenca.
- Candela, R. D. (2017). Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica.
- Carril, E. P.-U. (2011). Fotosíntesis: Aspectos Básicos. *REDUCA (Biología)*, 2(3).
- Chacón, C., Andrade, C., Cárdenas, C., Araujo, I., & Morales, E. (2004). Uso de *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela. *Boletín Del Centro de Investigaciones Biológicas*, 38(2).
- Chen, C.-Y., Yeh, K.-L., Aisyah, R., Lee, D.-J., & Chang, J.-S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71–81.
- Christenson, L., & Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances*, 29(6), 686–702.
- Contreras-Flores, C., Peña-Castro, J. M., Flores-Cotera, L. B., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*.
- Contreras Flores, C., Peña Castro, J. M., Flores Cotera, L. B., & Cañizares Villanueva, R. O. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, 28(8).
- Craggs, R. J., Zwart, A., Nagels, J. W., & Davies-Colley, R. J. (2004). Modelling sunlight disinfection in a high rate pond. *Ecological Engineering*, 22(2), 113–122.
- Cruz, I. (2015). *Diseño y construcción de un sistema de Bioreactores Airlift en serie*



para el cultivo semicontinuo de algas. Instituto Politécnico Nacional.

- Dalrymple, O. K., Halfhide, T., Udom, I., Gilles, B., Wolan, J., Zhang, Q., & Ergas, S. (2013). Wastewater use in algae production for generation of renewable resources: a review and preliminary results. *Aquatic Biosystems*, 9(1), 2.
- Delgado, G., & Orellana, M. (2015). *Estimación de la Radiación Solar Global Diaria en el Cantón Cuenca mediante la aplicación del Modelo Bristow & Campbell*. Universidad Politécnica Salesiana.
- GIMDEPPM. (2010). Polietileno de baja densidad. *Materials*. Barcelona: Grupo de Innovación para la Mejora de la Docencia en Estructura, Propiedades y Procesado de Materiales.
- González, L. E., Cañizares, R. O., & Baena, S. (1997). Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technology*, 60(3), 259–262.
- Grobbelaar, J. (1994). Turbulence in Mass Algal Cultures and the Role of Light/Dark Fluctuations. *Journal of Applied Phycology*, 6, 331–336.
- Guamán-Burneo, M. C., & Gonzáles, R. (2016). *Catálogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador*. Quito, Ecuador.
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Biología Marina Y Oceanografía*, 49, 157–173.
- Hoffmann, J. P. (1998). Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae. *Journal of Phycology*, 34(5), 757–763.
- Huerga Pérez, E. (2005). Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes, 10.
- Li, Y., Chen, Y.-F., Chen, P., Min, M., Zhou, W., Martinez, B., ... Ruan, R. (2011). Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. *Bioresource Technology*, 102(8), 5138–5144.



- Loera-Quezada, M. M., & Olgúin, E. J. (2010). Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. *Rev. Latinoam. Biotecnol. Amb. Algal*, 1(1), 91–116.
- Lu, C., & Vonshak, A. (1999). Photoinhibition in outdoor *Spirulina platensis* cultures assessed by polyphasic chlorophyll fluorescence transients. *Journal of Applied Phycology*, 11, 355–359.
- Metcalf, R., & Eddy, J. (1985). Ingeniería sanitaria. *Tratamiento, Evacuación Y Reutilización de Aguas Residuales*, 2, 84–87.
- Morita, M., Watanabe, Y., & Saiki, H. (2000). Investigation of photobioreactor design for enhancing the photosynthetic productivity of microalgae. *Biotechnology and Bioengineering*, 69(6), 693–698.
- Moronta, R., Mora, R., & Morales, E. (2006). Respuesta de la microalga *Chlorella sorokiniana* al pH, salinidad y temperatura en condiciones axénicas y no axénicas. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 23(1).
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Pearson educación.
- Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research*, 40(15), 2799–2815.
- Ogbonna, J. C., & Tanaka, H. (2000). Light requirement and photosynthetic cell cultivation--Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, 12(3–5), 65–72.
- Ojamäe, K. (2011). *Growth physiology and photosynthetic performance of green microalgae mass culture grown in a thin-layer cascade*. Master Thesis, University of Tartu, Faculty of Science and Technology, Institute of Ecology and Earth Sciences Department of Botany, Tartu.
- Ometto, F., Whitton, R., Coulon, F., Jefferson, B., & Villa, R. (2014). Improving the energy balance of an integrated microalgal wastewater treatment process. *Waste and Biomass Valorization*, 5(2), 245–253.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Organization of American States, General Secretariat.



- Orozco, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales*. acodal.
- Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35–42.
- Parra Rodriguez, L. M., & others. (2006). *Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.
- Peña, J., & Quiroz, C. (2013). *Algas diminutas. Un recurso natural renovable, abundante y de gran potencial industrial*. Medellín: Empresas Públicas de Medellín. Retrieved from <http://www.propiedadpublica.com.co/algas-diminutas-un-recurso-natural-renovable-abundante-y-de-gran-potencial-industrial/>
- Pierong, R., Nehrenheim, E., Carlsson, B., & Zambrano, J. (2016). Algae Based Wastewater Treatment Model Using The RWQM1. In *IWA World Water Congress & Exhibition*.
- Porto, A. (2007). El Anabolismo.
- Qiang, H., Guterman, H., & Richmond, A. (1996). Physiological characteristics of *Spirulina platensis* (Cyanobacteria) cultured at ultrahigh cell densities. *Journal of Phycology*, 32(6), 1066–1073.
- Rashid, N., Rehman, S. U., & Han, J.-I. (2013). Rapid harvesting of freshwater microalgae using chitosan. *Process Biochemistry*, 48(7), 1107–1110.
- Richmond, A. (2000). Microalgal Biotechnology at the Turn of the Millenium: A Personal View. *Journal of Applied Phycology*, 12, 441–451.
- Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. John Wiley & Sons.
- Richmond, A., Boussiba, S., Vonshak, A., & Kopel, R. (1993). A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors. *Journal of Applied Phycology*, 5.
- Rodríguez, L. G. (2009). El tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas como alternativa sostenible para el saneamiento periurbano en Cuba. *Revista de Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 30(1), 29–30.
- Rubio, F. C., Fernandez, F. G., Perez, J. A., Camacho, F. G., & Grima, E. M. (1999).



- Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnology and Bioengineering*, 62(1), 71–86.
- Salama, E.-S., Kurade, M. B., Abou-Shanab, R. A. I., El-Dalatony, M. M., Yang, I.-S., Min, B., & Jeon, B.-H. (2017). Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1189–1211.
- Sandoval, M. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor piloto para el crecimiento de la microalga Chlorella sp en el laboratorio de biotecnología y energías renovables de la empresa eléctrica Quito*. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí.
- Satpal, & Khambete, A. K. (2016). Wastewater treatment using micro-algae - A review paper. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 4(2), 188–192.
- Sekaran, G., Karthikeyan, S., Nagalakshmi, C., & Mandal, A. B. (2013). Integrated Bacillus sp. immobilized cell reactor and Synechocystis sp. algal reactor for the treatment of tannery wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(1), 281–291.
- Shilton, A. N. (2005). *Pond Treatment Technology*. IWA Publishin, London.
- Singh, R. N., & Sharma, S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Sobczuk, T. M., Camacho, F. G., Rubio, F. C., Fernandez, F. G., & Grima, E. M. (2000). Carbon dioxide uptake efficiency by outdoor microalgal cultures in tubular airlift photobioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 67(4), 465–475.
- Spikes, J. D., & Livingston, R. (1969). The molecular biology of photodynamic action. *Advances in Radiation Biology*, 3, 29–121.
- Tam, N. F. Y., & Wong, Y. S. (1989). Wastewater nutrient removal by Chlorella pyrenoidosa and Scenedesmus sp. *Environmental Pollution*, 58(1), 19–34.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse* (4th ed.). New York, NY: McGraw Hill.



- Valencia, E., Silva, I. J., & Narváez, C. P. (2010). Sistemas descentralizados integrados y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domesticas. *Ingeniería Y Región*, 7, 65–72.
- Vandamme, D., Foubert, I., Meesschaert, B., & Muylaert, K. (2010). Flocculation of microalgae using cationic starch. *Journal of Applied Phycology*, 22(4), 525–530.
- Vásquez, S. V., & Brenes, A. U. (2015). Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor tubular para producir la microalga *Chlorella* sp. *Revista de Ciencia Y Tecnología*, 30(1).
- Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., ... Ruan, R. (2010). Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162(4), 1174–1186.



7 ANEXOS



Anexo 2: Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes en Cuerpos de Agua Dulce

ANEXO 1 DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE:
NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA

TABLA 10. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sust. solubles en hexano	mg/l	30,0
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro Total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	10000
Color real ¹	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendedos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	1000
Sulfuros	S ⁻²	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0

¹ La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida



Anexo 3: Criterios de calidad admisible para aguas de uso agrícola de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Libro VI, Anexo I.

TABLA 6. Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola

Parámetros	Expresado como	Unidad	Limite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico (total)	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	1,0
Berilio	Be	mg/l	0,1
Boro (total)	B	mg/l	1,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,01
Carbamatos totales	Concentración total de carbamatos	mg/l	0,1
Cianuro (total)	CN ⁻	mg/l	0,2
Cobalto	Co	mg/l	0,05
Cobre	Cu	mg/l	2,0
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,1
Fluor	F	mg/l	1,0
Hierro	Fe	mg/l	5,0
Litio	Li	mg/l	2,5
Materia flotante visible			Ausencia
Manganeso	Mn	mg/l	0,2
Molibdeno	Mo	mg/l	0,01
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,001
Níquel	Ni	mg/l	0,2
Organofosforados (totales)	Concentración de organofosforados totales.	mg/l	0,1
Organoclorados (totales)	Concentración de organoclorados totales.	mg/l	0,2
Plata	Ag	mg/l	0,05
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Plomo	Pb	mg/l	0,05
Selenio	Se	mg/l	0,02
Sólidos disueltos totales		mg/l	3 000,0
Transparencia de las aguas medidas con el disco secchi.			mínimo 2,0 m
Vanadio	V	mg/l	0,1
Aceites y grasa	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Coniformes Totales	nmp/100 ml		1 000
Huevos de parásitos		Huevos por litro	cero
Zinc	Zn	mg/l	2,0



Anexo 4: Parámetros de los niveles guía de la calidad del agua para riego de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Libro VI, Anexo I.

TABLA 7. PARÁMETROS DE LOS NIVELES GUÍA DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO

PROBLEMA POTENCIAL	UNIDADES	*GRADO DE RESTRICCIÓN.			
		Ninguno	Ligero	Moderado	Severo
Salinidad (1):					
CE (2)	Milimhos/cm	0,7	0,7	3,0	>3,0
SDT (3)	mg/l	450	450	2000	>2000
Infiltración (4):					
RAS = 0 – 3 y CE		0,7	0,7	0,2	< 0,2
RAS = 3 – 6 y CE		1,2	1,2	0,3	< 0,3
RAS = 6 – 12 y CE		1,9	1,9	0,5	< 0,5
RAS = 12 – 20 y CE		2,9	2,9	1,3	<1,3
RAS = 20 – 40 y CE		5,0	5,0	2,9	<2,9
Toxicidad por ión específico (5):					
- Sodio:					
Irrigación superficial RAS (6)		3,0	3,0	9	> 9,0
Aspersión	meq/l	3,0	3,0		
- Cloruros					
Irrigación superficial	meq/l	4,0	4,0	10,0	>10,0
Aspersión	meq/l	3,0	3,0		
- Boro	mg/l	0,7	0,7	3,0	> 3,0
Efectos misceláneos (7):					
- Nitrógeno (N-NO3)	mg/l	5,0	5,0	30,0	>30,0
- Bicarbonato (HCO3)	meq/l	1,5	1,5	8,5	> 8,5
pH	Rango normal	6,5 –8,4			

*Es un grado de limitación, que indica el rango de factibilidad para el uso del agua en riego.

- (1) Afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos.
- (2) Conductividad eléctrica del agua: regadío (1 milimhos/cm = 1000 micromhos/cm).
- (3) Sólidos disueltos totales.
- (4) Afecta a la tasa de infiltración del agua en el suelo.
- (5) Afecta a la sensibilidad de los cultivos.
- (6) RAS, relación de absorción de sodio ajustada.
- (7) Afecta a los cultivos susceptibles.



Anexo 5: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 27/11/2017

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 3
---	---	---

FECHA: 2017/12/04

INFORME N°: 492/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 y 1/2 – Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 492/01-07/17
 DESCRIPCIÓN: Agua Residual
 PROCEDENCIA: PTAR – Cuenca
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/11/27
 ENTREGADAS POR: Muestreadores

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	CRUDA 492/01/17	AERADA 1 492/02/17	AERADA 2 492/03/17
DBO ₅	PEE/LS/FQ/01	2017/11/27 2017/12/02	mg/l	83	73	53
DBO ₅ SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2017/11/27 2017/12/02	mg/l		**	12
DQO	PEE/LS/FQ/06	2017/11/27	mg/l	299	262	221
DQO SOLUBLE	PEE/LS/FQ/06	2017/11/27	mg/l		73	74
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2017/11/27	mg/l	7.50	4.01	4.27
NITRATOS + NITRITOS *	SM 4500 NO3 E	2017/12/01	mgN/l	0.1	0.04	0.03
NITROGENO AMONIACAL *	SM 4500 NH3 C	2017/11/27	mg/l	13.78	15.21	17.8
NITRÓGENO ORGÁNICO *	SM 4500 Norg B	2017/12/02	mg/l	11.48	15.21	11.48
pH	PEE/LS/FQ/07	2017/11/27		6.98		
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2017/11/27	ml/l	0.6	1.5	2
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/11/27	mg/l	77	170	202
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/11/28	mg/l	65	90	90
SÓLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	2017/11/27	mg/l	384		
SULFUROS *	SM 4500 S E	2017/11/27	mg/l	<0.1	<0.1	0.8
SUST. SOLUBLES AL HEXANO *	SM 5520 D	2017/11/27	mg/l	20.4		
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/11/27 2017/11/29	NMP/ 100 ml	2.3E+07	1.7E+06	4.9E+06
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/11/28 2017/11/30	NMP/ 100 ml	2.3E+07	7.8E+05	4.9E+06
ALUMINIO *	SM/3120/ICP	2017/12/03	µg/l	710.3		
HIERRO	PEE/LS/AI/04	2017/12/03	µg/l	474.5		
MANGANESO	PEE/LS/AI/04	2017/12/03	µg/l	107.3		

** La DBO es mayor a la esperada, > 7 mg/l.

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 2 de 3
---	---	---

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	FACULTATIVA 1 492/04/17	FACULTATIVA 2 492/05/17
DBO ₅	PEE/LS/FQ/01	2017/11/27 2017/12/02	mg/l	32	26
DBO ₅ SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2017/11/27 2017/12/02	mg/l	12	11
DQO	PEE/LS/FQ/06	2017/11/27	mg/l	184	113
DQO SOLUBLE	PEE/LS/FQ/06	2017/11/27	mg/l	68	84
CLOROFILA a *	SM 10200 H	2017/11/27 2017/11/28	ug/l	122.96	216.51
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2017/11/27	mg/l	3.43	3.26
NITRATOS + NITRITOS *	SM 4500 NO3 E	2017/12/01	mgN/l	0.04	0.05
NITROGENO AMONIAICAL *	SM 4500 NH3 C	2017/11/27	mg/l	18.08	18.37
NITRÓGENO ORGÁNICO *	SM 4500 Norg B	2017/12/02	mg/l	13.2	8.04
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2017/11/27	ml/l	0.3	0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/11/27	mg/l	72	29
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/11/28	mg/l	50	27
SULFUROS *	SM 4500 S E	2017/11/27	mg/l	0.8	<0.1
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/11/27 2017/11/29	NMP/ 100 ml	7.9E+05	7.9E+05
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/11/28 2017/11/30	NMP/ 100 ml	4.9E+05	7.9E+05

** La DBO₅ es mayor a la esperada, > 14 mg/l.

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	MADURACIÓN 1 492/06/17	MADURACIÓN 2 492/07/17
DBO ₅	PEE/LS/FQ/01	2017/11/27 2017/12/02	mg/l	29	32
DBO ₅ SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2017/11/27 2017/12/02	mg/l	**	11
DQO	PEE/LS/FQ/06	2017/11/27	mg/l	140	176
DQO SOLUBLE	PEE/LS/FQ/06	2017/11/27	mg/l	79	64
COLOR REAL *	SM2120 C	2017/11/27	UC	50	86
CLOROFILA a *	SM 10200 H	2017/11/27 2017/11/28	ug/l	1205.52	155.03
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2017/11/27	mg/l	4.06	3.32
NITRATOS + NITRITOS *	SM 4500 NO3 E	2017/12/01	mgN/l	0.16	0.09
NITROGENO AMONIAICAL *	SM 4500 NH3 C	2017/11/27	mg/l	16.93	18.66
NITRÓGENO ORGÁNICO *	SM 4500 Norg B	2017/12/02	mg/l	10.05	12.34
pH	PEE/LS/FQ/07	2017/11/27		7.17	6.84
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2017/11/27	ml/l	0	0.1
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/11/27	mg/l	29	45
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/11/28	mg/l	27	43
SÓLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	2017/11/27	mg/l	332	349
SULFUROS *	SM 4500 S E	2017/11/27	mg/l	<0.1	0.8
SUST. SOLUBLES AL HEXANO*	SM 5520 D	2017/11/27	mg/l	5.6	11.6
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/11/27 2017/11/29	NMP/ 100 ml	1.4E+05	2.3E+05
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/11/28 2017/11/30	NMP/ 100 ml	7E+04	1.3E+05
ALUMINIO *	SM/3120/ICP	2017/12/03	µg/l	124.1	189.5
HIERRO	PEE/LS/AI/04	2017/12/03	µg/l	282.7	357.9
MANGANESO	PEE/LS/AI/04	2017/12/03	µg/l	61.8	137.8

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

** La DBO es mayor a la esperada, > 5 mg/l.

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-13

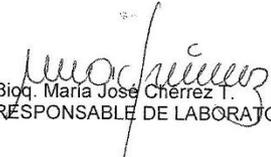


LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 3 de 3
---	---	---

PARÁMETRO	DBO5	DQO (>100)	DQO (<100)	SÓLIDOS TOTALES	pH	FOSFORO TOTAL	SOLIDOS SUSPEND.
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	12.7% (95 %, k=1.96)	13.05% (95 %, k=1.99)	17.21 % (95 %, k=1.96)	3.03 % (95 %, k=2.01)	9.04% (95 %, k=1.96)	10.76% (95 %, k=1.96)

HIERRO	MANGANESO
2.5 % (95 %, k=1.96)	2.0 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,


 Bioq. María José Chérrez T.
 RESPONSABLE DE LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-13



Anexo 6: Resultados de los análisis de Laboratorio para determinación de crecimiento de la biomasa en el período de pruebas desde el día 27/11/2017 al día 04/12/2017

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2017/12/05

INFORME N°: 495/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 495/01/17
 DESCRIPCIÓN: Efluente Reactor
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/11/28
 ENTREGADAS POR: Sr. Paul Montalván

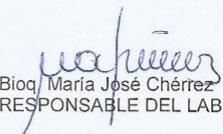
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor 495/01/17
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/11/29	mg/l	69
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/12/01	mg/l	56

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	SOLIDOS SUSPEND.
INCERTIDUMBRE	10.76% (95 %, k=1.96)

Atentamente,


 Bioq/ María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13



(a) Día 1 – 28/11/2017

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2017/12/06

INFORME N°: 501/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 501/01/17
 DESCRIPCIÓN: Efluente Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/11/29
 ENTREGADAS POR: Sr. Paul Montalván

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor 501/01/17
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/11/30	mg/l	23
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/12/01	mg/l	19

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	SOLIDOS SUSPEND.
INCERTIDUMBRE	10.76% (95 %, k=1.96)

Atentamente,

Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(b) Día 2 – 29/11/2017



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2017/12/07

INFORME N°: 503/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 503/01/17
 DESCRIPCIÓN: Efluente Reactor
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/11/30
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

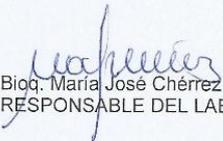
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor 503/01/17
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/11/30	mg/l	65
SÓLID. SUSP. VOLÁTILES*	SM 2540 E	2017/12/01	mg/l	44

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	SOLIDOS SUSPEND.
INCERTIDUMBRE	10.76% (95 % k=1.98)

Atentamente,


 Bta. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(c) Día 3 – 30/11/2017



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2017/12/08

INFORME N°: 508/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 508/01/17
 DESCRIPCIÓN: Efluente Reactor
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/01
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor 508/01/17
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/12/01	mg/l	96
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/12/05	mg/l	71

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	SÓLIDOS SUSPEND.
INCERTIDUMBRE	10.76% (95 %, k=1.96)

Atentamente,

Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(d) Día 4 – 01/12/2017



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2017/12/04

INFORME N°: 494/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 494/01/17
 DESCRIPCIÓN: Efluente Reactor
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/04
 ENTREGADAS POR: Sr. Paul Montalván

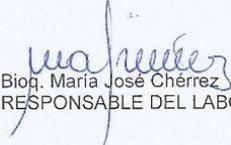
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor 494/01/17
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/11/27	mg/l	163
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/11/28	mg/l	117

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	SÓLIDOS SUSPEND.
INCERTIDUMBRE	10.75% (95 %, k=1.96)

Atentamente,


 Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(e) Día 7 – 04/12/2017



Anexo 7: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 04/12/2017

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. - Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 3
---	---	---

FECHA: 2017/12/11

INFORME N°: 512/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 y 1/2 - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 512/01-07/17
 DESCRIPCIÓN: Agua Residual
 PROCEDENCIA: PTAR – Cuenca
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/04
 ENTREGADAS POR: Muestradores

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	CRUDA 512/01/17	AERADA 1 512/02/17	AERADA 2 512/03/17
DBO ₅	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l	101	72	50
DBO ₅ SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l		14	8
DQO	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l	239	198	259
DQO SOLUBLE*	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l		49	42
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2017/12/08	mg/l	4	3.07	3.04
NITRATOS + NITRITOS *	SM 4500 NO ₃ E	2017/12/11	mgN/l	0.39	0.06	0.08
NITROGENO AMONIAICAL *	SM 4500 NH ₃ C	2017/12/04	mg/l	14.93	14.93	15.50
NITROGENO ORGANICO *	SM 4500 Norg B	2017/12/08	mg/l	7.46	10.33	13.20
pH	PEE/LS/FQ/07	2017/12/04		7.01		
SOLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2017/12/04	ml/l	2.5	2	2
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/12/04	mg/l	136	206	252
SOLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/12/05	mg/l	83	90	96
SOLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	2017/12/04	mg/l	420		
SULFATOS *	SM 4500 SO ₄ E	2017/12/04	mg/l	252.29	41.30	42.27
SULFUROS *	SM 4500 S E	2017/12/04	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1
SUST. SOLUBLES AL HEXANO *	SM 5520 D	2017/12/06	mg/l	12.8		
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/04 2017/12/06	NMP/ 100 ml	1.1E-07	3.3E+06	3.3E+06
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/05 2017/12/07	NMP/ 100 ml	7E+06	1.3E+06	3.3E+06
ALUMINIO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	2185.2		
ARSENICO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	< 30		
BARIO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	223		
BORO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	187.7		
CADMIO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 10		
COBALTO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 10		
COBRE	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	13.9		
CROMO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 20		
ESTANO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	< 300		
HIERRO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	1135.2		
MANGANESO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	133.6		
MERCURIO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	< 6		
NIQUEL	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 50		
PLATA	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 5		
PLOMO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 50		
SELENIO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	< 200		

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MCO0406-13



Anexo 8: Resultados de los análisis de Laboratorio para el primer período de pruebas – Desde el 04/12/2017 al 06/12/2017

<p>LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568</p>	<p>Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004</p>	<p>INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1</p>
--	---	---

FECHA: 2017/12/13

INFORME N°: 516/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 516/01/17
DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
PROCEDENCIA: PTAR
FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/05
ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

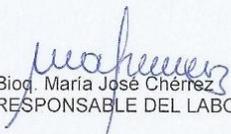
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 516/01/17
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2017/12/05 2017/12/10	mg/l	115
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/05 2017/12/07	NMP/ 100 ml	7.8E+06
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/06 2017/12/08	NMP/ 100 ml	2.0E+06

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,


Bioq. María José Chérrez
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(a) Día 1 – 05/11/2017



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2017/12/14

INFORME N°: 519/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 519/01/17
 DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/06
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 519/01/17
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2017/12/06 2017/12/11	mg/l	34
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/06 2017/12/08	NMP/ 100 ml	4E+05
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/07 2017/12/09	NMP/ 100 ml	**

SM: STANDARD METHODS, Edición 22
 ** No hay crecimiento en la dilucion sembrada

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,

Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(b) Día 2 – 06/12/2017



Anexo 9: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 06/12/2017

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 3
---	---	---

FECHA: 2017/12/11

INFORME N°: 512/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 y 1/2 – Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 512/01-07/17
 DESCRIPCIÓN: Agua Residual
 PROCEDENCIA: PTAR – Cuenca
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/04
 ENTREGADAS POR: Muestreadores

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	CRUDA 512/01/17	AERADA 1 512/02/17	AERADA 2 512/03/17
DBO ₅	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l	101	72	50
DBO ₅ SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l		14	8
DQO	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l	239	198	259
DQO SOLUBLE*	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l		49	42
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2017/12/08	mg/l	4	3.07	3.04
NITRATOS + NITRITOS *	SM 4500 NO3 E	2017/12/11	mgN/l	0.39	0.06	0.08
NITROGENO AMONIAICAL *	SM 4500 NH3 C	2017/12/04	mg/l	14.93	14.93	15.50
NITROGENO ORGANICO *	SM 4500 Norg B	2017/12/08	mg/l	7.46	10.33	13.20
pH	PEE/LS/FQ/07	2017/12/04		7.01		
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2017/12/04	ml/l	2.5	2	2
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/12/04	mg/l	136	206	252
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2017/12/05	mg/l	83	90	96
SÓLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	2017/12/04	mg/l	420		
SULFATOS *	SM 4500 SO4 E	2017/12/04	mg/l	252.29	41.30	42.27
SULFUROS *	SM 4500 S E	2017/12/04	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1
SUST. SOLUBLES AL HEXANO *	SM 5520 D	2017/12/06	mg/l	12.8		
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/04 2017/12/06	NMP/ 100 ml	1.1E+07	3.3E+06	3.3E+06
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/05 2017/12/07	NMP/ 100 ml	7E+06	1.3E+06	3.3E+06
ALUMINIO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	2185.2		
ARSENICO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	< 30		
BARIO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	223		
BORO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	187.7		
CADMIO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 10		
COBALTO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 10		
COBRE	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	13.9		
CROMO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 20		
ESTAÑO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	< 300		
HIERRO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	1135.2		
MANGANESO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	133.6		
MERCURIO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	< 6		
NIQUEL	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 50		
PLATA	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 5		
PLOMO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 50		
SELENIO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	< 200		

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 2 de 3
---	---	---

VANADIO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	5.8		
ZINC *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	356.7		

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	FACULTATIVA 1 512/04/17	FACULTATIVA 2 512/05/17
DBO ₅	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l	37	21
DBO ₅ SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l	15	8
DQO	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l	208	115
DQO SOLUBLE	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l	57	61
CLOROFILA a *	SM 10200 H	2017/12/04 2017/12/05	ug/l	13.72	19.09
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2017/12/08	mg/l	10.25	2.41
NITRATOS + NITRITOS *	SM 4500 NO3 E	2017/12/11	mgN/l	0.24	0.12
NITROGENO AMONIAICAL *	SM 4500 NH3 C	2017/12/04	mg/l	18.94	17.22
NITRÓGENO ORGÁNICO *	SM 4500 Norg B	2017/12/08	mg/l	9.18	9.76
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2017/12/04	ml/l	0.1	0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/12/04	mg/l	54	24
SÓLID. SUSP. VOLÁTILES*	SM 2540 E	2017/12/05	mg/l	47	20
SULFATOS *	SM 4500 SO4 E	2017/12/04	mg/l	39.37	37.20
SULFUROS *	SM 4500 S E	2017/12/04	mg/l	<0.1	<0.1
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/04 2017/12/06	NMP/ 100 ml	4.9E+05	1.3E+06
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/05 2017/12/07	NMP/ 100 ml	4.9E+05	7.9E+05

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	MADURACIÓN 1 512/06/17	MADURACIÓN 2 512/07/17
DBO ₅	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l	34	43
DBO ₅ SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2017/12/04 2017/12/09	mg/l	15	8
DQO	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l	216	178
DQO SOLUBLE	PEE/LS/FQ/06	2017/12/04	mg/l	62	57
COLOR REAL *	SM2120 C	2017/12/04	UC	43	46
CLOROFILA a *	SM 10200 H	2017/12/04 2017/12/05	ug/l	368.87	814.33
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2017/12/08	mg/l	2.45	2.59
NITRATOS + NITRITOS *	SM 4500 NO3 E	2017/12/11	mgN/l	0.12	0.20
NITROGENO AMONIAICAL *	SM 4500 NH3 C	2017/12/04	mg/l	17.80	17.22
NITRÓGENO ORGÁNICO *	SM 4500 Norg B	2017/12/08	mg/l	10.91	11.48
pH	PEE/LS/FQ/07	2017/12/04		7.12	7.08
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2017/12/04	ml/l	0.1	0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2017/12/04	mg/l	35	57
SÓLID. SUSP. VOLÁTILES*	SM 2540 E	2017/12/05	mg/l	33	53
SÓLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	2017/12/04	mg/l	340	356
SULFATOS *	SM 4500 SO4 E	2017/12/04	mg/l	36.00	45.40
SULFUROS *	SM 4500 S E	2017/12/04	mg/l	<0.1	<0.1
SUST. SOLUBLES AL HEXANO*	SM 5520 D	2017/12/06	mg/l	8.4	8.8
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/04 2017/12/06	NMP/ 100 ml	2.3E+05	3.3E+05

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-13



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 3 de 3
---	---	---

COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/05 2017/12/07	NMP/ 100 ml	7.9E+04	1.7E+05
ALUMINIO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	149.6	119.8
ARSENICO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	< 30	< 30
BARIO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	75.8	35.3
BORO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	144.5	125.7
CADMIO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 10	< 10
COBALTO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 10	< 10
COBRE	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 10	< 10
CROMO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 20	< 20
ESTANO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	< 300	< 300
HIERRO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	259.9	257
MANGANESO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	32.7	175.7
MERCURIO *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	< 6	< 6
NIQUEL	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 50	< 50
PLATA	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 5	< 5
PLOMO	PEE/LS/AI/04	2017/12/07	µg/l	< 50	< 50
SELENIO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	< 200	< 200
VANADIO *	SM/3120/ICP	2017/12/08	µg/l	< 5	< 5
ZINC *	SM/3120/ICP	2017/12/07	µg/l	66.7	44.3

PARAMETRO	METODO	FECHA ANÁLISIS	UNIDADES	CRUDA 512/01/17	MADURACIÓN 1 512/06/17	MADURACIÓN 2 512/07/17
H. DE HELMINTOS *	NOM-001-ECOL/96	2017/12/04 2017/12/08				
Ascaris sp.			#/L	1.6		
Himenolepis sp.			#/L	0.6		
Uncinarias sp.			#/L	0.0		
Toxocara sp.			#/L	0.0		
Trichuris sp.			#/L	0.2		
H.H/L			#/L	2.4	Ausencia	Ausencia

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	DBO5	DCO (>100)	DCO (<100)	SÓLIDOS TOTALES	pH	FOSFORO TOTAL	SOLIDOS SUSPEND.	COBRE
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	12.7% (95 %, k=1.96)	13.05% (95 %, k=1.99)	17.21 % (95 %, k=1.96)	3.03 % (95 %, k=2.01)	9.04% (95 %, k=1.96)	10.76% (95 %, k=1.96)	1.44 % (95 %, k=2.09)

HIERRO	MANGANESO	BARIO	CADMIO	COBALTO	CROMO	NIQUEL	PLATA	PLOMO
2.5 % (95 %, k=1.96)	2.0 % (95 %, k=1.96)	2.5 % (95 %, k=1.96)	2.8 % (95 %, k=1.96)	3.0 % (95 %, k=1.96)	3.1 % (95 %, k=1.96)	3.2 % (95 %, k=1.96)	2.18 % (95 %, k=1.96)	3.3 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,


 Bioq. María José Chérrez T.
 RESPONSABLE DE LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-13



Anexo 10: Resultados de los análisis de Laboratorio para el segundo período de pruebas – Desde el 06/12/2017 al 08/12/2017

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2017/12/14

INFORME N°: 524/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 524/01/17
 DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/07
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

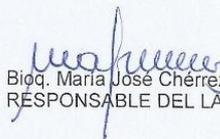
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 524/01/17
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2017/12/07 2017/12/12	mg/l	40
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/07 2017/12/09	NMP/ 100 ml	4.9E+06
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/08 2017/12/10	NMP/ 100 ml	4.5E+05

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,


 Bíoq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13



(a) Día 1 – 07/12/2017

<p>LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568</p>	<p>Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004</p>	<p>INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1</p>
--	---	---

FECHA: 2017/12/15

INFORME N°: 529/17

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS DIAZ

DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 529/01/17

DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico

PROCEDENCIA: PTAR

FECHA DE RECEPCIÓN: 2017/12/08

ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

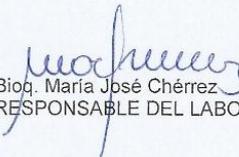
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 529/01/17
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2017/12/08 2017/12/13	mg/l	45
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2017/12/08 2017/12/10	NMP/ 100 ml	1.4E+05
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2017/12/09 2017/12/11	NMP/ 100 ml	6.1E+04

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18,12 % (95 %, k=1,96)

Atentamente,


Biól. María José Chérrez
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(b) Día 2 – 08/12/2017



Anexo 11: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 10/01/2018

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2018/01/17

INFORME N°: 009/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS FELIPE DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5^{1/2} – Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 009/01-03/18
 DESCRIPCIÓN: Agua Residual
 PROCEDENCIA: PTAR – Cuenca
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/10
 ENTREGADAS POR: Muestreadores

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	CRUDA 009/01/18	MADUR. 1 009/02/18	MADUR. 2 009/03/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/10 2018/01/15	mg/l	108	31	18
DBO5 SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2018/01/10 2018/01/15	mg/l		7	8
DQO	PEE/LS/FQ/06	2018/01/10	mg/l	340	86	73
DQO SOLUBLE	PEE/LS/FQ/06	2018/01/10	mg/l		45	53
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2018/01/10	ml/l	4	0	0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2018/01/10	mg/l	238	41	22
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2018/01/11	mg/l	140	39	19
SÓLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	2018/01/10	mg/l	512	295	266
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/10 2018/01/12	NMP/ 100 ml	1.1E+07	4.9E+04	2.6E+03
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/11 2018/01/13	NMP/ 100 ml	1.1E+07	9.4E+03	2.6E+03

PARÁMETRO	DBO5	DQO (>100)	DQO (<100)	SOLIDOS SUSPEND.	SÓLIDOS TOTALES
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	12.7% (95 %, k=1.96)	13.05% (95 %, k=1.99)	10.76% (95 %, k=1.96)	17.21 % (95 %, k=1.96)

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

Atentamente,

Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DE LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- “Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE”

MC0406-13



**Anexo 12: Resultados de los análisis de Laboratorio del tercer período de pruebas
– Desde el 10/01/2018 al 17/01/2018**

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2018/01/19

INFORME N°: 017/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. ANDRES ALVARADO (PTAR-TESIS)
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 017/01/18
 DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/12
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 017/01/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/12 2018/01/17	mg/l	41
pH *	PEE/LS/FQ/07	2018/01/12		10.77
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2018/01/15	mg/l	280
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2018/01/16	mg/l	220
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/12 2018/01/14	NMP/ 100 ml	5.4E+05
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/13 2018/01/15	NMP/ 100 ml	3.5E+04

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	DBO5	SOLIDOS SUSPEND.	pH
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	10.76% (95 %, k=1.96)	3.03 % (95 %, k=2.01)

Atentamente,

Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(a) Día 2 – 12/01/2018



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2018/01/22

INFORME N°: 024/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. ANDRES ALVARADO (PTAR-TESIS)
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 024/01/18
 DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/15
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 024/01/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/15 2018/01/20	mg/l	26
pH *	PEE/LS/FQ/07	2018/01/15		11.18
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/15 2018/01/17	NMP/ 100 ml	1.1E+04
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/16 2018/01/18	NMP/ 100 ml	3.3E+03

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

Observación: No se realizó el análisis de sólidos suspendidos y sólidos suspendidos volátiles debido a pérdida de la muestra

PARAMETRO	DBO5	pH
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	3.03 % (95 %, k=2.01)

Atentamente,

Biog. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(b) Día 5 – 15/01/2018



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2018/01/24

INFORME N°: 030/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. ANDRES ALVARADO (PTAR-TESIS)
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 030/01/18
 DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/17
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jimenez

RESULTADOS

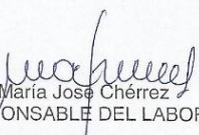
PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 030/01/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/17 2018/01/22	mg/l	***
pH *	PEE/LS/FQ/07	2018/01/17		11.27
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2018/01/17	mg/l	50
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2018/01/18	mg/l	50
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/17 2018/01/19	NMP/ 100 ml	**
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/18 2018/01/20	NMP/ 100 ml	**

** : No hay crecimiento a la dilución sembrada

*** : La DBO es menor a 20

PARÁMETRO	DBO5	SOLIDOS SUSPEND.	pH
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	10.76% (95 %, k=1.95)	3.03 % (95 %, k=2.01)

Atentamente,


 Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(c) Día 7 – 17/01/2018



Anexo 13: Resultados de los Análisis de Laboratorio del muestreo rutinario de la PTAR Ucubamba – Día 17/01/2018

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2018/01/24

INFORME N°: 028/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. LUIS FELIPE DIAZ
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5_{1/2} – Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 028/01-03/18
 DESCRIPCIÓN: Agua Residual
 PROCEDENCIA: PTAR – Cuenca
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/17
 ENTREGADAS POR: Muestreadores

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	CRUDA 028/01/18	MADUR. 1 028/02/18	MADUR. 2 028/03/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/17 2018/01/22	mg/l	91	12	13
DBO5 SOLUBLE	PEE/LS/FQ/01	2018/01/17 2018/01/22	mg/l		9	5
DQO	PEE/LS/FQ/06	2018/01/17	mg/l	284	47	53
DQO SOLUBLE	PEE/LS/FQ/06	2018/01/17	mg/l		29	31
SÓLIDOS SEDIMENTABLES *	SM 2540 F	2018/01/17	ml/l	3.5	0	0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2018/01/17	mg/l	336	20	19
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2018/01/18	mg/l	138	20	17
SÓLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	2018/01/17	mg/l	590	275	285
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/17 2018/01/19	NMP/ 100 ml			
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/18 2018/01/20	NMP/ 100 ml			

Nota: No entregan muestras para coliformes totales y termotolerantes.

PARÁMETRO	DBO5	DQO (>100)	DQO (<100)	SÓLIDOS SUSPEND.	SÓLIDOS TOTALES
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	12.7% (95 %, k=1.96)	13.05% (95 %, k=1.99)	10.76% (95 %, k=1.96)	17.21 % (95 %, k=1.96)

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

Atentamente,

Biog. María José Chérrez T.
 RESPONSABLE DE LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13



**Anexo 14: Resultados de los análisis de Laboratorio del cuarto período de pruebas
– Desde el 17/01/2018 al 24/01/2018**

<p>LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568</p>	<p>Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004</p>	<p>INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1</p>
--	---	---

FECHA: 2018/01/26

INFORME N°: 033/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. ANDRES ALVARADO (PTAR-TESIS)
DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

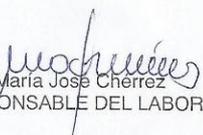
CODIGO: 033/01/18
DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
PROCEDENCIA: PTAR
FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/19
ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jiménez

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 033/01/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/19 2018/01/24	mg/l	19
pH *	PEE/LS/FQ/07	2018/01/19		11.89
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2018/01/19	mg/l	29
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2018/01/20	mg/l	27
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/19 2018/01/21	NMP/ 100 ml	1.7E+03
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/20 2018/01/22	NMP/ 100 ml	2E+02

PARÁMETRO	DBO5	SOLIDOS SUSPEND.	pH
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	10.76% (95 %, k=1.96)	3.03 % (95 %, k=2.01)

Atentamente,


Bioq. María José Chérrez
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13



(a) Día 2 – 19/01/2018

LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2018/01/29

INFORME N°: 035/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. ANDRES ALVARADO (PTAR-TESIS)
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 ½ - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 035/01/18
 DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/22
 ENTREGADAS POR: Sr. Damian Jiménez

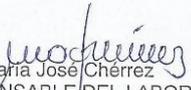
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 035/01/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/22 2018/01/27	mg/l	15
pH *	PEE/LS/FQ/07	2018/01/22		11.80
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2018/01/23	mg/l	32
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2018/01/25	mg/l	30
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/22 2018/01/24	NMP/ 100 ml	4.9E+03
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/23 2018/01/25	NMP/ 100 ml	1.3E+03

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	DBO5	SOLIDOS SUSPEND.	pH
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	10.76% (95 %, k=1.96)	3.03 % (95 %, k=2.01)

Atentamente,


 Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE"

MC0406-13

(b) Día 5 – 22/01/2018



LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2018/01/31

INFORME N°: 045/18

CLIENTE

NOMBRE: ING. ANDRES ALVARADO (PTAR-TESIS)
 DIRECCIÓN: Panamericana Norte Km 5 1/2 - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 045/01/18
 DESCRIPCIÓN: Reactor Biológico
 PROCEDENCIA: PTAR
 FECHA DE RECEPCIÓN: 2018/01/24
 ENTREGADAS POR: Sr. Paúl Montalván

RESULTADOS

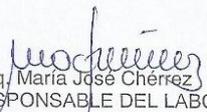
PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	Efluente Reactor Biológico 045/01/18
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2018/01/24 2018/01/29	mg/l	21
pH *	PEE/LS/FQ/07	2018/01/24		11.90
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	2018/01/24	mg/l	46
SÓLID. SUSP. VOLATILES*	SM 2540 E	2018/01/25	mg/l	46
COLIFORMES TOTALES *	SM 9221 E	2018/01/24 2018/01/26	NMP/ 100 ml	**
COLIFORMES TERMOTOLERANTES *	SM 9221 E	2018/01/25 2018/01/27	NMP/ 100 ml	**

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

** : No hay crecimiento a la dilución sembrada.

PARÁMETRO	DBO5	SOLIDOS SUSPEND.	pH
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)	10.76 % (95 %, k=1.96)	3.03 % (95 %, k=2.01)

Atentamente,

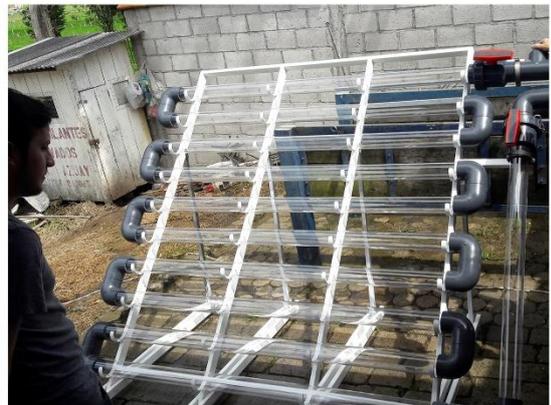
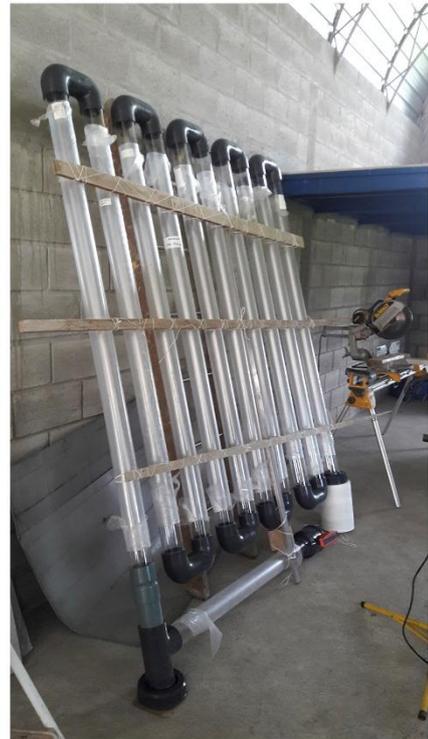

 Bioq. María José Chérrez
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- “Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE”

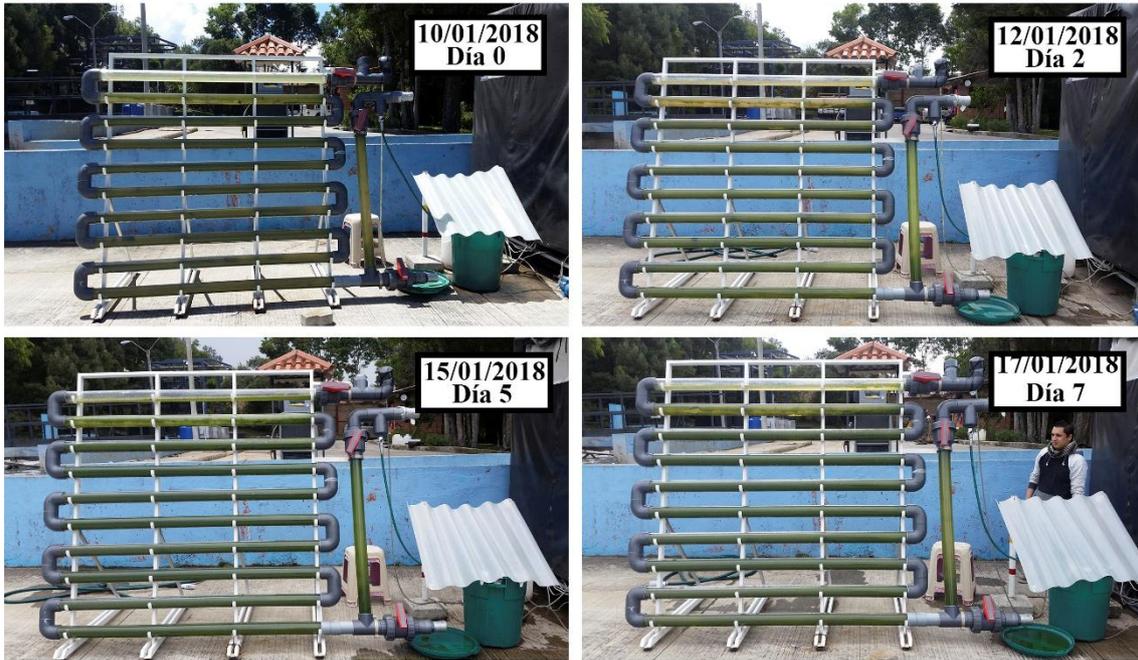
MC0406-13

(c) Día 7 – 24/01/2018

Anexo 15: Materiales y Construcción del Receptor Solar



Anexo 16: Registro fotográfico del tercer período de pruebas



Anexo 17: Visita de los estudiantes de la Universidad de Texas A&M

