

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LAS
AGUAS RESIDUALES PORCÍCOLAS EN LA COLONIA AGRÍCOLA DE MÍNIMA
SEGURIDAD DE ACACÍAS META.



JULIETH LORENA CORTÉS HENAO
NORMA KARINA RODRÍGUEZ CRIOLLO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2017

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LAS
AGUAS RESIDUALES PORCÍCOLAS EN LA COLONIA AGRÍCOLA DE MÍNIMA
SEGURIDAD DE ACACÍAS META.

JULIETH LORENA CORTÉS HENAO
NORMA KARINA RODRÍGUEZ CRIOLLO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director (a)
HENRY CONTRERAS LEÓN
Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2017

Autoridades Académicas

P JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

Rector General

P MAURICIO ANTONIO CORTES GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P FERNANDO CAJICÁ GAMBOA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Adm. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Notas de Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de la facultad de Ingeniería Ambiental

HENRY CONTRERAS LEÓN

Director trabajo de grado

CRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Jurado

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Jurado

Villavicencio, Septiembre de 2017

Dedicatoria

A Dios, por llenarnos de fuerza para continuar ante cada dificultad y por brindarnos la oportunidad de vivir esta experiencia.

A nuestros padres, por cada consejo, apoyo, esfuerzo y amor incondicional, por recorrer este camino y creer en nosotras en todo momento. A nuestras familias porque también gracias a cada uno de ellos somos las personas de hoy.

A nuestros compañeros de vida, Jheyson y Wilson por su continuo apoyo, paciencia y por celebrar junto a nosotras cada logro alcanzado.

Lorena y Karina

Agradecimientos

Mediante estas cortas palabras, queremos agradecer a Dios por guiar cada paso y permitirnos culminar esta etapa, la cual se convirtió en una aventura con tropiezos y algunas dificultades, pero siempre con la firme convicción de perseverar y alcanzar cada una de las metas propuestas.

A nuestras familias gracias de todo corazón por el apoyo y confianza incondicional a lo largo de nuestro proceso de formación universitaria y personal. A nuestros amigos Carolina, Conny y Manuel quienes hicieron de este camino un gran recorrido.

Al Ingeniero Henry Contreras León director del Proyecto de Grado, por su confianza, paciencia y colaboración, así como sus sugerencias y conocimientos que hicieron posible la estructuración, ejecución y finalización exitosa de este proyecto.

A la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta por abrirnos las puertas de la institución y por su colaboración para la realización del proyecto, en especial al personal Directivo en cabeza del Doctor Daniel Enrique Ortíz Mendoza, Subdirector TC(r) Edgar Horacio Ledezma, al Médico Veterinario y Zootecnista Carlos Enrique Correa Echenique y a los jefes de las áreas de Porcicultura, Dg. Miguel Ángel Folleco, Plan Institucional de Gestión Ambiental (PIGA) Dg. Juan Manuel Roza Salinas, y a los funcionarios Néstor Barragán Moreno, Rubier Baracaldo Ortiz por compartir con nosotros su experiencia y conocimiento en todo lo relacionado con el proceso de producción porcícola y manejo ambiental.

Agradecemos a la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, la Facultad de Ingeniería Ambiental en cabeza de la Ingeniera Natalia Mosquera Beltrán y a todos los profesores que con sus conocimientos, apoyo y orientación hicieron parte de nuestra formación profesional, especialmente a quienes hicieron posible el desarrollo de este proyecto; la docente Alexandra Méndez Leal por su apoyo y asesoría en el área de microbiología, la docente Carolina Méndez Leal, coordinadora de laboratorios y su equipo de trabajo por la colaboración constante durante el desarrollo del trabajo de campo.

Contenido

	Pág.
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Descripción Del Problema	4
2. OBJETIVOS	6
2.1. Objetivo General.	6
2.2. Objetivos Específicos.	6
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. ALCANCE DEL PROYECTO	9
4.1. Ubicación	9
4.2. Generalidades Del Área De Estudio.....	9
5. ANTECEDENTES	11
6. MARCO REFERENCIAL	14
6.1. Marco Teórico	14
6.2. Marco Conceptual	17
6.3. Marco Legal	19
7. HIPÓTESIS	22
8. METODOLOGÍA.....	23
8.1. Área De Estudio	23
8.2. Temporalidad Del Estudio	23
9. RESULTADOS	32
9.1. Diagnóstico de la Situación Actual del Sistema de Tratamiento de Lagunas de Estabilización	32
9.2. Evaluación Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales De La Actividad Porcícola En La Colonia Agrícola De Acacias.	38
9.2.1. Parámetros <i>in situ</i>	38
9.2.2. Parámetros En Laboratorio.	54
9.3. Datos De Precipitación En La Zona De Estudio (IDEAM)	60

9.4. Comparativo del diseño actual del sistema de tratamiento con referentes teóricos.	61
9.5. Levantamiento Batimétrico	57
9.6. Tiempo De Retención.....	59
9.7. Casos Exitosos.....	59
10. ALTERNATIVAS QUE PERMITAN MEJORAR EL SISTEMA DE TRATAMIENTO.	60
10.1. Costos De Alternativas De Mejoramiento.	63
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES	65
CONCLUSIONES	67
ANEXOS	70
REFERENCIAS.....	83

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Lagunas de estabilización objeto de estudio y las comunidades aledañas.	10
Figura 2. Puntos de muestreo de agua residual en el sistema de tratamiento.	25
Figura 3. Esquema metodológico para el desarrollo del trabajo de grado.	32
Figura 4. Razas de cerdos del sistema de producción porcícola de la Colonia Agrícola.	33
Figura 5. Sistema de recolección y conducción de aguas lluvia de la Colonia Agrícola.	34
Figura 6. Sólidos de gran tamaño y residuos hospitalarios que ingresan al sistema de tratamiento.	36
Figura 7. Laguna 1 del sistema de tratamiento sin mantenimiento.	37
Figura 8. Caudal horario de entrada del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas.	39
Figura 9. Sólidos sedimentables de entrada del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas.	39
Figura 10. Cono Imhoff durante la medición de sólidos sedimentables en la entrada del sistema de tratamiento.	40
Figura 11. Variación de la temperatura en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda.	44
Figura 12. Variación del pH en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda.	47
Figura 13. Variación del oxígeno disuelto en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda.	50
Figura 14. Variación de la conductividad en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda.	53
Figura 15. Medios de cultivo selectivos de microorganismos específicos utilizados en los análisis microbiológicos.	55
Figura 16. Comparativo normativo entre DBO ₅ , DQO y SST (Resolución 0631 de 2015).	57
Figura 17. Comportamiento del oxígeno disuelto en las lagunas a diferentes profundidades.	59
Figura 18. Valores de precipitación del municipio de Acacias-Meta (períodos 2001-2008)	61
Figura 19. Valores de precipitación del municipio de Acacias-Meta (periodos 2009-2016)	61
Figura 20. Perfiles longitudinales (batimetría); (a): Laguna 1; (b): Laguna 2; (c): Laguna 3.	58

Lista De Tablas

Pág.

Tabla 1. Comparativo entre los parámetros a medir y los valores máximos permisibles para las resoluciones 1207 de 2014 y 0631 de 2015	20
Tabla 2. Variables a medir, métodos de análisis y sitio de muestreo	25
Tabla 3. Equipos utilizados en la medición de parámetros In situ.....	27
Tabla 4 Inventario de cerdos, requerimientos y excretas producidas según la fase de producción.	32
Tabla 5. Dimensiones de las lagunas.	36
Tabla 6. Aporte de aguas lluvias (litros/día) al sistema de tratamiento.	41
Tabla 7. Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable temperatura	42
Tabla 8 Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable temperatura.	43
Tabla 9. Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable pH	45
Tabla 10. Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable pH.....	46
Tabla 11. Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable oxígeno disuelto	48
Tabla 12. Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable oxígeno disuelto	49
Tabla 13. Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable conductividad.....	51
Tabla 14. Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable conductividad.....	51
Tabla 15. Resultados del análisis microbiológico en la temporada húmeda y seca.	54
Tabla 16. Eficiencias y concentraciones reportadas del sistema de tratamiento en temporada seca y húmeda.....	55
Tabla 17. Prueba t para muestras relacionadas	56
Tabla 18. Concentración de oxígeno disuelto para lagunas aerobias, anóxicas y anaerobias	60
Tabla 19. Comparativo del diseño actual del sistema de lagunaje con referentes teóricos	55
Tabla 20. Costos de alternativas de mejoramiento	63
Tabla 21. Datos para el cálculo del TRH.....	72

Anexos

	Pág.
ANEXO 1. Cálculo Eficiencia Del Sistema De Tratamiento	70
ANEXO 2. Tiempos De Retención Hidráulica.....	72
ANEXO 3. Cálculos De Diseño.....	74
ANEXO 4. Alternativas de Mejoramiento Propuestas para el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Porcícolas en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta.....	82

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas por medio de lagunas de estabilización en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta, éste se desarrolló a partir de un diagnóstico inicial, de monitoreos *In Situ* (oxígeno disuelto (O.D.); Conductividad; Caudal, pH, temperatura del agua (°C) y sólidos sedimentables (Ssed.) y monitoreos *Ex Situ* (demanda química de oxígeno (DQO); demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅); sólidos suspendidos totales (SST) y parámetros microbiológicos (*Coliformes termotolerantes*, *Enterococos fecales* y *Salmonella sp.*) en la temporada seca (febrero y marzo) y húmeda (abril y mayo). El sistema, está conformado por tres lagunas en serie, una anóxica (No.1) y dos aerobias (No. 2 y 3). Se determinó que el sistema manejó un rango de temperaturas entre los 23°C y 33°C; en cuanto al pH, O.D. y conductividad las variaciones fueron entre 6.2 y 8.89 unidades; 2.76 y 23.43 ppm y 989 y 1567 µS/cm, respectivamente. El caudal de entrada máximo diario del sistema fue de 3 l/s, con valores de 134 ml/l para los sólidos sedimentables, este factor sumado al tiempo de operación genera la colmatación de las lagunas. El sistema ha logrado adaptarse a las condiciones en términos de eficiencia del sistema, puesto que, la mayor eficiencia promedio de remoción fue en temporada seca con datos de DBO₅ 97.68%, DQO 90.98% y SST 82.17%, comparada con la temporada húmeda, en donde los porcentajes registrados fueron de 96.94%, 89.60% y 79.4% respectivamente; los parámetros microbiológicos evaluados, registraron ausencia en el efluente del sistema en la temporada seca. Los factores de incidencia identificados en la eficiencia del sistema de tratamiento: (i) dilución de las concentraciones de DBO₅, DQO y SST en el afluente por el alto flujo de agua lluvia; (ii) uso de Microorganismos Eficientes (EM) en el sistema productivo y directamente en la laguna No.1. Finalmente, se formularon propuestas a nivel conceptual, enfocadas en optimizar los procesos a través de la ejecución de obras de mejoramiento como la instalación de cribado, desarenador, by-pass, blafes deflectores, adecuación de tuberías de entrada, conexión y salida del sistema y segregación del agua lluvia del efluente porcícola a tratar.

Palabras claves: lagunas de estabilización, remoción de materia orgánica, agua residual porcina, eficiencia, solidos sedimentables.

Abstract

The main objective of this study was to evaluate the efficiency of the porcine water treatment system by means of stabilization ponds in the Minimal security agricultural colony of Acacias, Department of Meta, which was developed from an initial diagnosis by means of *In Situ* Monitoring (Dissolved oxygen (OD), conductivity, flow rate, pH, water temperature (° C) and sedimentable solids (Ssed.); *Ex situ* monitoring (chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD₅) (SST) and microbiological parameters (thermotolerant coliforms, fecal enterococci and Salmonella sp.)) during the dry season (February and March) and rainy season (April and May). The system was identified as three series lagoons, one anoxic (No.1) and two aerobic (No. 2 and 3). The study allowed us to determine that the system managed a temperature range between 23 ° C and 33 ° C; In terms of pH, O.D. And conductivity variations were 6.2 and 8.89 units; 2.76 and 23.43 ppm and 989 and 1567 µS / cm, respectively. The maximum daily inlet flow of the system was 3 l / s with values of 134 ml / l for sedimentable solids, this factor added to the time of operation generates the filling of the lagoons. The system has been able to adapt to the conditions in terms of efficiency of the system, since the highest average removal efficiency was in dry season with data of BOD₅ 97.68% COD 90.98% and SST 82.17%, compared to the rainy season, where the percentages recorded were 96.94%, 89.60% and 79.4%, respectively; In terms of the microbiological parameters evaluated, they were absent in the system effluent in the dry season. The following factors of incidence in the efficiency of the treatment system: (i) dilution of the concentrations of BOD₅, COD and SST in the affluent by high flow of the rain; (ii) use of Efficient Microorganisms (EM) in the production system and directly in lagoon No.1. Finally, we formulated conceptual strategies for the optimization of the processes, such as the screening facility, desander, by-pass, baffles and segregation of the rainwater of the porous effluent to treat, which have to be executed by the Institution.

Key Words: stabilization ponds, organic matter removal, porcine wastewater, efficiency, sedimentable solids.

Introducción

Alrededor del 80% de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descargan sin previo tratamiento, generando contaminación a fuentes hídricas y al suelo (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), 2009).

El subsector porcícola genera efluentes con altas concentraciones de materia orgánica que requiere tratamiento previo a su disposición, para contrarrestar la variación en las propiedades físicoquímicas y microbiológicas del agua (Nuñez, Urrutia, Urcelay, & Oviedo, 1987).

Las lagunas de estabilización son una estrategia indicada y ampliamente utilizada para el tratamiento de este tipo de efluente en países de la región, debido a su alta eficiencia en degradación de materia orgánica, remoción de patógenos y helmintos sin necesidad de realizar un proceso de cloración al efluente para su desinfección; obteniendo efluentes de alta calidad en nutrientes, aptos para ser reutilizados en procesos tales como riego de praderas, cultivos de consumo no directo y piscicultura; así como la facilidad y el bajo costo que representa su construcción, mantenimiento y operación (Guevara & León, 1996). Pese a estas potencialidades, por causa de (i) inadecuados diseños, (ii) deficiente mantenimiento y (iii) falta de supervisión a nivel operacional pueden presentar deficiencias en la remoción de contaminantes (Guevara & León, 1996).

La Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta genera aguas residuales a partir de la producción porcícola, las cuales son tratadas mediante un sistema compuesto por tres lagunas de estabilización. Pese a generar este tipo de efluente, la entidad no posee información técnica del sistema de lagunaje, ni registros de análisis *In Situ* y de laboratorio que les permita conocer las características del agua residual a tratar, la calidad del efluente obtenido y la eficiencia general del sistema de tratamiento.

La necesidad de realizar estudios que analicen el funcionamiento de este sistema de tratamiento considerando diseño, operación y mantenimiento resulta prioritaria, puesto que permite identificar deficiencias y proponer alternativas de mejoramiento y optimización de las mismas, para así mitigar las afectaciones de tipo ambiental, social y económico que se puedan generar.

1. Planteamiento Del Problema

1.1. Descripción Del Problema

El subsector porcícola genera grandes volúmenes de agua residual, en relación directa con la demanda del recurso hídrico para el proceso productivo, representada por el agua de bebida para los cerdos y la limpieza de los corrales; este tipo de efluente contiene altas concentraciones de materia orgánica que genera cambios en las propiedades físico-químicas y microbiológicas del agua, siendo un medio indicado para que agentes contaminantes migren a otros sistemas naturales, por lo anterior es necesario un tratamiento previo a su disposición (Garzón & Buelna, 2013).

Las lagunas de estabilización son una de las estrategias regularmente utilizadas para el tratamiento de estos efluentes, por su viabilidad económica, en cuanto a su bajo costo, fácil construcción y operación (Rolim S. , 1999). Pese a estas potencialidades, suelen presentar deficiencias en la remoción de contaminantes resultado de (i) malos diseños, (ii) falta de mantenimiento y (iii) falta de supervisión a nivel operacional (Guevara & León, 1996).

La necesidad de realizar estudios que analicen el funcionamiento de este sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas resulta prioritaria, puesto que, permite proponer alternativas de mejoramiento de las deficiencias que se identifiquen en el sistema y enfocarlas en su optimización, para así contrarrestar las afectaciones de tipo ambiental, social y económico derivadas de procesos ineficientes de tratamiento de las aguas residuales.

Tales como afectaciones de tipo social a poblaciones aledañas por proliferación de malos olores, las cuales fueron manifestadas en años anteriores a través de acciones populares de los habitantes vecinos contra la entidad en aras de garantizar un ambiente sano.

Específicamente la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta genera aguas residuales porcícolas, las cuales son tratadas mediante un sistema biológico, compuesto por cuatro lagunas de estabilización, de las cuales tres se encuentran en funcionamiento, éstas operan en serie

y sus profundidades se desconocen debido a la carencia de planos estructurales del sistema de tratamiento. Esta entidad pública, pese a generar este tipo de efluente, no cuenta con registros de análisis *In Situ* y de laboratorio que permita establecer la calidad del efluente y sustentar la eficiencia del sistema de lagunaje, así mismo carece de un plan de mantenimiento periódico de las lagunas para retirar vegetación indeseable y sedimentos acumulados; siendo esto fundamental para garantizar la remoción de los contaminantes presentes en el agua y prevenir la colmatación de las lagunas (Correa C. , 2016).

Para la entidad es importante conocer la eficiencia del proceso de tratamiento para establecer el cumplimiento de la normatividad ambiental pertinente y a su vez garantizar que no se estaría impactando negativamente otro sistema natural (suelo) puesto que, una vez finalizado el tratamiento del agua residual ésta podría ser nuevamente utilizada en el riego de praderas, en predios de la entidad, tal como se venía realizando en años anteriores.

A partir de lo anterior se plantea la siguiente pregunta problema ¿Cuál es la eficiencia del sistema de lagunas de estabilización en el tratamiento de las aguas residuales porcícolas en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta y qué aspectos se pueden mejorar para dar cumplimiento con los parámetros establecidos por la normatividad ambiental referente a la disposición final de este efluente?

2. Objetivos

2.1. Objetivo General.

Evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacías Meta, mediante monitoreos del efluente que validen el cumplimiento de la normatividad ambiental referente y permita proponer alternativas de mejora.

2.2. Objetivos Específicos.

Caracterizar el efluente porcícola mediante monitoreo *in situ* y *ex situ* de parámetros físicos, químicos y microbiológicos en los procesos unitarios de tratamiento, a fin de validar el cumplimiento de la normatividad ambiental referente a su disposición final.

Comparar el diseño actual del sistema de lagunaje en cuanto a: dimensiones físicas, factores ambientales, caudal y operación mediante la revisión de referentes teóricos, que permitan establecer aspectos a mejorar en el proceso de tratamiento.

Proponer alternativas de mejoramiento del sistema de tratamiento, minimizando los efectos adversos directos e indirectos que se puedan estar generando en el entorno.

3. Justificación

Los efluentes evacuados a fuentes hídricas superficiales o a regadíos sin el adecuado tratamiento son un medio indicado para que agentes contaminantes migren a otros sistemas naturales (suelo, aguas subterráneas) (Nuñez, Urrutia, Urcelay, & Oviedo, 1987). Como principales características identificadas de las aguas residuales porcícolas están: la materia orgánica, nitrógeno (NTK), fósforo (P Total), materia en suspensión (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) (Lasbleiz, 1989); en cuanto a organismos patógenos se han identificado los que conforman el grupo de los *Coliformes totales*; *Escherichia*, *Enterobacter*; los *coliformes fecales* (*Escherichia*) (Canosa, 1995).

Con base en lo anterior la resolución 1207 de 2014 establece el reúso para el agua residual en labores específicas de tipo agrícola como cultivo de pastos y forrajes para consumo animal, cultivos no alimenticios para humanos o animales e industrial como descarga de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de vías, sistemas de redes contraincendios, entre otros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Para garantizar el reúso de este efluente se requiere un tratamiento previo que logre minimizar las condiciones de carga orgánica de nutrientes que generan efectos adversos sobre el suelo, agua y aire; una de las estrategias utilizadas con mayor frecuencia son los sistemas de tratamiento biológico, entre estos los sistemas de lagunaje que permiten obtener efluentes con excelente calidad bacteriológica y aporte en nutrientes, los cuales pueden ser aprovechados en actividades agropecuarias y en Piscicultura (Escalante, Garzón, & Valle, 2012).

Sin embargo, pese a ser una muy buena opción de tratamiento, por efectos de deficiencias en los diseños e inadecuada operación, es común que se presenten disminuciones en la eficiencia. Al respecto, cabe destacar que el sistema de lagunaje objeto de estudio no cuenta a la fecha con información disponible del arranque y puesta en marcha de las lagunas, tanto a nivel de diseño como de construcción; pese a esto se ha podido establecer, por visitas realizadas que se presentan algunas deficiencias a nivel de construcción, operación y mantenimiento, condiciones a considerar

como indicios de la inadecuada operación del sistema de lagunaje, de acuerdo con su capacidad de diseño.

Por lo anterior se requieren estrategias que permitan identificar las deficiencias a nivel de diseño, operación y mantenimiento y a partir de esto proponer alternativas de mejoramiento de las condiciones del proceso, que sean factibles de implementar para la empresa con el objetivo de disminuir la carga contaminante del efluente, minimizar el grado de afectación al ambiente y a la población aledaña (propagación de malos olores); dar cumplimiento con los parámetros establecidos por la normatividad ambiental referente a la disposición final que se puede hacer de este efluente, así como evitar sanciones económicas, las cuales demandan recursos que podrían ser utilizados en otras necesidades de la entidad.

El desarrollo del presente estudio contribuye a que medioambiente y sociedad reciben los efectos extendidos del conocimiento y los aportes que desde la ingeniería ambiental se realicen; sumado a esto se establecen lazos de cooperación técnica con entidades públicas, privadas, gremios y productores a nivel municipal y departamental; quienes tendrán acceso a información técnica referente al tratamiento biológico de efluentes de procesos productivos; indicado para ser implementado de forma masiva en la región teniendo en cuenta las facilidades, ventajas y bajos costos asociados a su implementación y manejo.

4. Alcance Del Proyecto

4.1. Ubicación

La Colonia Agrícola de Mínima Seguridad se encuentra ubicada en el municipio de Acacías al noroccidente del departamento del Meta, República de Colombia. Tiene una altura sobre el nivel del mar de 498 metros y una extensión total de 1.169 Kilómetros cuadrados (km²) aproximadamente. Su distancia a Villavicencio es de 28 kilómetros.

Acacías limita al norte con el departamento de Cundinamarca, al sur con los municipios de Castilla la Nueva y Guamal, al oriente con San Carlos de Guaroa, y al occidente con Guamal.

La mayor parte del municipio tiene un régimen de lluvias que oscilan entre 3.000 y 4.000 mm por año, los meses de mayor nivel de precipitación son abril, mayo y junio; la temperatura promedio se encuentra entre los 17 y 27°C (Concejo Municipal de Acacías Meta, 2011).

4.2. Generalidades Del Área De Estudio

La Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacías Meta cuenta con tres lagunas de estabilización en funcionamiento, para el tratamiento de las aguas residuales de la producción porcícola, la cual actualmente tiene una población total de 419 porcinos (Correa C. , 2016). La Figura 1 muestra la ubicación espacial de las lagunas de estabilización del área de estudio.

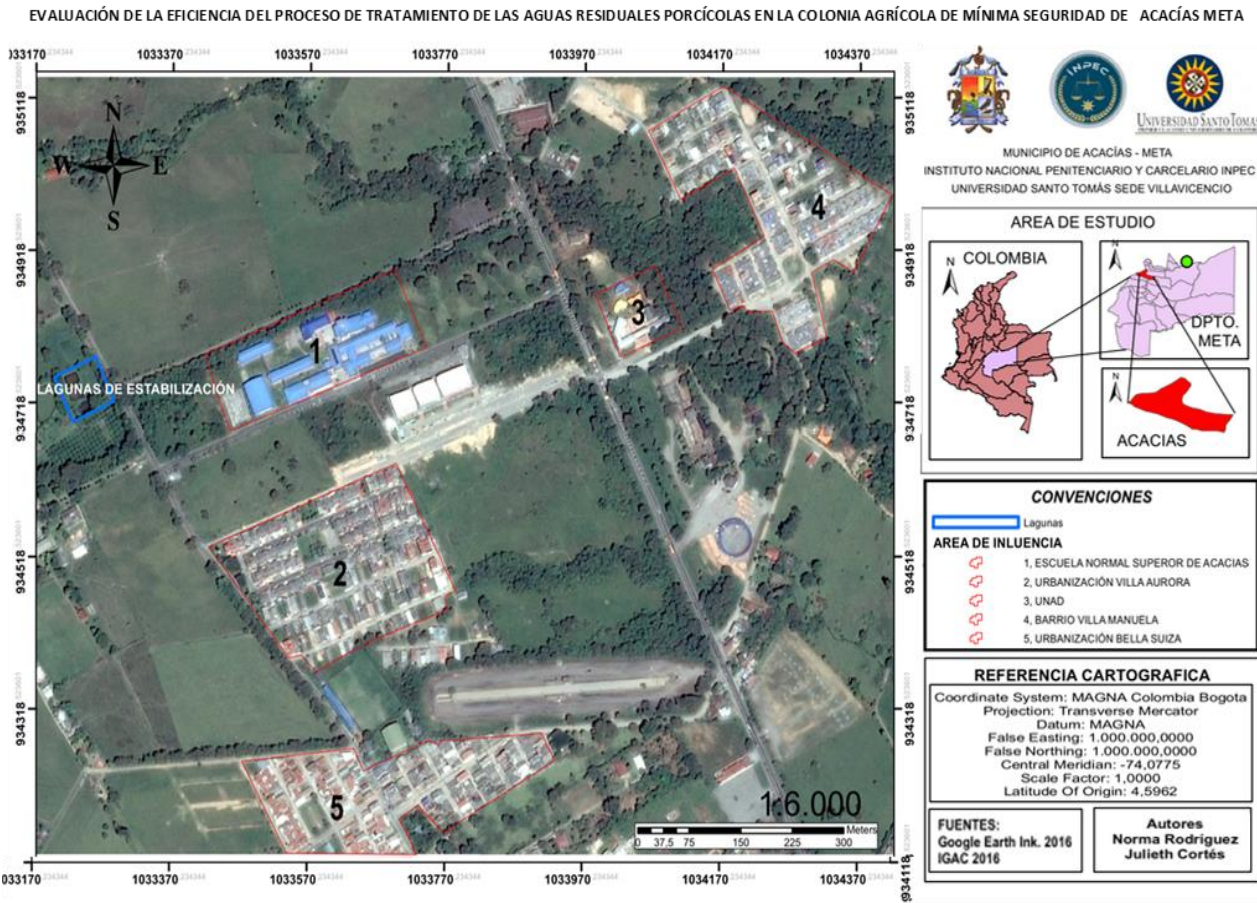


Figura 1. Lagunas de estabilización de la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta y las comunidades aledañas a la entidad. Por: Cortés & Rodríguez, 2016. Elaborado a partir del software ArcGis. 10.1, bajo la licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

5. Antecedentes

Los efluentes evacuados sin el adecuado tratamiento son un medio indicado para que agentes contaminantes migren a otros sistemas naturales (suelo, aguas superficiales, aguas subterráneas) (Nuñez, Urrutia, Urcelay, & Oviedo, 1987).

Por lo anterior, se contempla el tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización como uno de los sistemas más destacados e idóneos al contexto del presente trabajo, teniendo en cuenta que es un sistema de tratamiento biológico, de costo mínimo de operación, adaptable a diversos requerimientos y el cual permite obtener efluentes de excelente calidad bacteriológica y alto contenido en nutrientes, aptos para ser aprovechados en procesos de reúso en actividades agropecuarias e industriales a partir de las características del efluente (Guevara & León, 1996).

Diversas investigaciones desarrolladas en México para tratamiento de efluentes porcícolas por lagunas de estabilización han logrado identificar la correlación entre las características del agua residual porcícola, el volumen de excretas producidas por el animal y factores como: edad del animal, madurez fisiológica, cantidad y composición del alimento consumido. Al respecto se pudo concluir la importancia de la caracterización previa del efluente, que permita estimar el diseño de los sistemas de tratamiento necesarios (Escalante, CIAP - Centro de Información de Actividades Porcinas, 2000), (Escalante & Garzón, Opciones de Tratamiento para Aguas Residuales de Tres Granjas Porcícolas, 2010), (Garzón & Buelna, 2013); así mismo estos autores realizaron muestreo y caracterización de las aguas residuales, estableciendo los parámetros más significativos a monitorear, como lo son: pH, temperatura, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), nitrógeno total (N-T), fósforo total (P-T) y Coliformes Fecales (CF) y a partir de esto establecer el comportamiento de los mismos frente a diversos factores de influencia, ya sean de tipo físico, químico, biológico y microbiológico.

En algunas metodologías de investigaciones realizadas se evaluaron y monitorearon el comportamiento de las unidades de tratamiento, a través de muestreos en los puntos más

significativos de los respectivos sistemas, a la entrada y salida de cada unidad de tratamiento (González, 2013), (Correa, Cuervo, Mejía, & Aguirre, 2012).

Trabajos recientes han identificado tres limitantes correlacionados del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas por lagunas de estabilización: (i) no realizar caracterización previa de los efluentes a tratar; (ii) dimensionamiento y construcción del sistema sin tener los cálculos de diseño necesarios, por lo cual no se obtiene la eficiencia de remoción esperada de sólidos, ni de materia orgánica; (iii) inadecuado funcionamiento de las mismas, partiendo de la concepción errada que se ha tenido, al considerar que el sistema de lagunaje puede trabajar sin supervisión (Rolim S. , 1999), (Correa G. , Universidad de Antioquia, 2008) , (Garzón & Buelna, 2013).

La información presentada muestra que existen investigaciones realizadas en torno a las lagunas de estabilización, sin embargo en cuanto al tratamiento específico de aguas residuales porcícolas, aún se presentan vacíos que permitan establecer de manera más clara y precisa parámetros para mejorar el diseño, la construcción y la operación de dichas instalaciones, a partir de las características de este efluente, los requerimientos de tratamiento y las posibilidades de reúso que puedan realizarse, a fin de evitar aplicaciones erróneas.

Lo anterior debe ser abordado en concordancia con la realidad del lugar donde se establece el sistema de tratamiento puesto que, factores ambientales, de infraestructura, de mantenimiento, económico, entre otros, terminan por interponerse en el adecuado funcionamiento y la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales en los casos en los que se llevan a cabo y convertirse en hecho común que se estén afectando procesos fundamentales como la reducción de organismos patógenos por el desconocimiento de aspectos claves como la influencia que puede ejercer la temperatura y sus distintas variaciones durante el día, en otros casos, el comportamiento hidráulico de las lagunas e incluso la inadecuada o nula toma de datos que permitan evaluar adecuadamente la información generada y que a su vez se convierta en insumo para futuros procesos investigativos (Yáñez, 1982).

Los antecedentes de la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacías, Meta, se remontan al 4 de julio de 1966, en donde La dirección general de prisiones en asociación con el Servicio

Nacional de Aprendizaje - SENA y la Gobernación del Meta, inician la implementación de proyectos agrícolas, pecuarios e industriales en la entidad, con el fin de brindar herramientas que faciliten el proceso de resocialización del personal interno, a través de capacitación y entrenamiento en labores agropecuarias. En el año 1982, se implementa de forma técnica la explotación porcícola en el establecimiento.

Para el año 1999, se construyen cuatro lagunas de estabilización para el tratamiento de los efluentes líquidos generados; sin embargo, en el año 2000 Corporinoquia determinó la necesidad de hacer manejos adecuados de vertimientos y excretas porcinas debido a la afectación ambiental que se ejercía al caño Cola de pato y a poblaciones vecinas.

En el año 2003 pobladores del barrios aledaños como: Villa Aurora, Bella Suiza y la Escuela Normal Superior de Acacías, instauran una Acción popular en contra de la Colonia Agrícola por propagación de malos olores a causa del sistema productivo porcícola; lo anterior puso de manifiesto la presunta deficiencia del sistema de tratamiento, sin embargo, hasta el momento no se había realizado un seguimiento técnico al sistema que permitiera identificar la causa de la aparente deficiencia (Correa C. , 2016).

En el año 2008 (Cortés & García, 2008), se realiza un trabajo de grado de especialización en gestión ambiental sostenible en la *Formulación del Plan de Manejo y Vertimientos de Aguas Residuales en el Campamento Cola de Pato, Colonia Agrícola de Acacías Municipio de Acacías*, en el cual se relaciona información del lugar, el sistema productivo porcícola y los sistemas de tratamiento instalados para realizar la remoción de carga contaminante de las aguas residuales (biodigestor, lagunas de oxidación), los cuales según dicho trabajo presentaron deficiencias en su funcionamiento desde su instalación.

El presente trabajo se configura como el primer abordaje que se realiza a nivel técnico del sistema de tratamiento de las aguas residuales de la producción porcícola al interior de la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacías, Meta y significa un punto de partida para futuras investigaciones en diversos temas del ámbito ambiental.

6. Marco Referencial

6.1. Marco Teórico

Los efluentes del subsector porcícola al carecer de tratamiento y bajo ciertas condiciones son susceptibles de generar metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) (Escalante, Garzón, & Valle, Remoción de Macronutrientes en el Tratamiento de Aguas Residuales Porcícolas, 2012), así como contaminación de las aguas y los suelos por los nitratos resultado de la oxidación del amoníaco (nitrificación) (CORMACARENA & Asociación Colombiana de Porcicultores, 2015).

El tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización involucra complejos procesos microbiológicos y bioquímicos que no deben ser desconocidos, teniendo en cuenta que éstos configuran la naturaleza del sistema. Para efluentes porcícolas resulta indicado en la degradación de materia orgánica y eliminación de microorganismos patógenos que puedan generar afectación a la salud. Estos efluentes poseen alta calidad bacteriológica, lo cual le confiere capacidad de reúso en diversas actividades agropecuarias (cultivos de consumo no directo) e industriales (limpieza - enfriamiento de calderas).

Existen diversas formas de clasificar las lagunas de estabilización, a razón de: el régimen de flujo, el modelo de operación, ubicación y contenido de oxígeno; las combinaciones y el número de unidades a implementar, éstas varían a razón de las características y requerimiento de calidad del efluente (Guevara & León, 1996).

Respecto a otros sistemas convencionales de tratamiento, las lagunas tienen requerimientos operacionales, de mantenimiento y control mínimos, más no nulos, los cuales deben ser revisados y cumplidos con cierta periodicidad (Romero, 2005). Así mismo se han identificado como limitantes recurrentes que: (i) no se efectúa caracterización previa de los efluentes a tratar; (ii) el dimensionamiento e incluso la construcción del sistema se realiza sin los cálculos de diseño necesarios, ni proyecciones de la producción, por lo cual no se obtiene la eficiencia de remoción

esperada de sólidos ni de materia orgánica; (iii) inadecuado funcionamiento de las mismas puesto que se tiene la concepción que, por ser sistemas de tratamiento biológico pueden trabajar sin supervisión, ni mantenimiento (Rolim S. , 1999).

Los organismos realizan dos tipos de actividad en el proceso de descomposición biológica de las aguas residuales, la oxidación aerobia y la oxidación anaerobia (Romero, 2005).

La oxidación aerobia también conocida como “mineralización”, es decir la conversión bacterial de los elementos, de su forma orgánica a su forma inorgánica, es decir que al ser el oxígeno el aceptador final de electrones, es reducido, mientras que los que donan dichos electrones son oxidados. Este proceso es fundamental para obtener la energía suficiente para sintetizar tejido celular nuevo e involucra tres reacciones fundamentales: (i) catabolismo, oxidación o descomposición;(ii) anabolismo, síntesis o asimilación; (iii) autólisis, respiración endógena o autooxidación (Romero, 2005).

La oxidación anaerobia se encarga de realizar la descomposición en ausencia de oxígeno disuelto y el oxígeno que se usa es el de compuestos orgánicos, nitratos, nitritos, los sulfatos y el CO₂, como aceptador de electrones. Se puede afirmar que ésta descomposición se puede realizar con todos los compuestos orgánicos que contengan oxígeno en sus moléculas. Las dos etapas globalmente identificadas en la descomposición de la materia orgánica son: fermentación ácida y fermentación del metano, éstas ocurren bajo procesos complejos y múltiples reacciones que se desarrollan en simultáneo y se relacionan entre sí (Romero, 2005).

Las algas son fundamentales en el proceso biológico al ser los organismos responsables de la producción de oxígeno molecular, a su vez elemento vital para las bacterias encargadas de la oxidación bioquímica de la materia orgánica. Por ello se puede inferir que el suministro de oxígeno fotosintético por la actividad bacteriana aerobia es el indicado, sin embargo, se debe mantener la presencia de algas en niveles adecuados puesto que, el inconveniente radica en cuanto se pierde el equilibrio ecológico debido a que fácilmente se puede generar el predominio de la fase anaerobia (Organización Panamericana de La Salud & Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2005).

A partir de estudios sobre factores de influencia sobre el sistema de tratamiento, se consideran pertinentes al presente proyecto la **temperatura** por su incidencia sobre las reacciones físicas, químicas y bioquímicas y su relación con la radiación solar por la alteración de la velocidad de fotosíntesis y del metabolismo de las bacterias responsable del proceso depurativo (Ruiz & Oviedo, 2013).

El **Viento** por el efecto de aireación a través de la interface aire-agua, el efecto de mezcla por parte del viento puede evitar el desarrollo de estratificación térmica (Ruiz & Oviedo, 2013). Así mismo teniendo en cuenta la incidencia en la población aledaña por transporte de malos olores.

En cuanto al **oxígeno disuelto**, su concentración varía en función de la profundidad de la laguna (disminuye al aumentar la profundidad) y el momento del día (máximos durante el día y valores mínimos en la noche). La **profundidad** a su vez incide en el crecimiento de vegetación indeseable, y en la intensidad de la mezcla por acción de los vientos, siendo más alta a menor profundidad; de igual manera conocer la profundidad y la estratificación de la columna de agua, permite conocer de manera más clara los procesos biológicos al interior de las lagunas (Martinez, 2007).

El **pH** es un parámetro de incidencia importante, el cual varía durante el día y presenta valores bajos en la mañana y en la noche, debido a la presencia de CO_2 producto de la respiración bacteriana en condiciones aerobias (durante la noche) y al no haber consumo de CO_2 por parte de las algas (Martinez, 2007). El desarrollo de un pH alto (8.5 - 9.0) genera que la actividad bacteriana disminuya al igual que el proceso simbiótico (Romero, 2005). Cuando el pH se ubica por debajo de 7, generalmente en lagunas anaerobias, se produce ácido sulfhídrico (H_2S), con el consecuente mal olor; en valores de pH menores a 6.2, las condiciones se tornan tóxicas para las bacterias anaerobias (Massachusetts Institute of Technology - (MIT), 2006).

La **precipitación** en las lagunas de estabilización genera oxigenación en la parte superficial de éstas, debido a factores como la turbulencia generada en la caída de las gotas de agua y al contenido de oxígeno propio del agua lluvia. Sumado a esto puede presentarse aumento del caudal a la entrada del sistema, reducción en los tiempos de retención y disminución del oxígeno disuelto por

la demanda adicional de oxígeno por parte de los sólidos arrastrados al interior de la laguna (Martinez, 2007).

Así mismo, teniendo en cuenta la temporalidad del estudio (época seca y húmeda) resulta oportuno establecer si la precipitación aporta variaciones positivas o negativas significativas al sistema de tratamiento (Martinez, 2007).

6.2. Marco Conceptual

Las **lagunas de estabilización** son estructuras abiertas de almacenamiento de aguas residuales, diseñadas para realizar el tratamiento por medio de interacción de biomasa (algas, bacterias, protozoarios, entre otros), es decir, procesos naturales de purificación biológica que ocurren en todo cuerpo natural de agua; éstas actúan como grandes reservorios en los cuales las aguas residuales entran y salen del sistema después de un período de retención definido (Kellner & Pires, 1998).

Para el caso particular de estudio, el sistema de tratamiento está conformado por tres lagunas en serie, la primera anóxica, seguida por dos aerobias. Sin embargo, se espera que las características iniciales de diseño, e incluso los procesos biológicos que ocurren en su interior se hayan modificado, ante la ausencia de mantenimiento.

Las **lagunas aerobias** también pueden ser denominadas lagunas de oxidación por algunos autores, éstas realizan la estabilización de la materia orgánica bajo condiciones estrictamente aerobias. En general existen de dos tipos, en función de la profundidad y el objetivo, en la primera es maximizar la producción de algas (15 – 45 cm) y en la segunda maximizar la producción de oxígeno (hasta 1.5 m de profundidad) (Romero, 2005).

Las **lagunas anaerobias** se caracterizan por manejar elevadas cargas orgánicas que imposibilitan la formación de una zona aerobia al interior. Para el caso particular a las aguas residuales industriales, éstas deben tener un DBO₅ mayor de 1000 mg/L (Romero, 2005). La

temperatura, el tiempo de retención y el diseño son determinantes, el diseño a partir de la carga volumétrica disminuye la probabilidad de generación de malos olores (Yáñez, 1982).

El funcionamiento es similar a un biorreactor, es decir, el principio de sedimentación y acumulación de los sólidos en el fondo y la flotación de materiales del agua residual, junto a biomasa activa suspendida en el agua o adherida a los lodos sedimentados y a la nata flotante. Generalmente es abierta a la atmósfera, sin embargo, puede cubrirse y recuperar el metano producido y con ello, disminuir la proliferación de malos olores (Romero, 2005).

Las **lagunas anóxicas** generalmente se consideran como lagunas anaerobias, sin embargo, éstas presentan características específicas en cuanto a la cantidad de oxígeno disuelto, el cual debe ser menor a 0.2 mg/L con presencia de nitrato (Massachusetts Institute of Technology - (MIT), 2006).

Las **lagunas facultativas** también son llamadas secundarias porque se encargan de recibir el efluente de lagunas anaerobias. Están diseñadas para remoción de DBO₅ con base en una baja carga orgánica superficial en el rango de 100-400 kg DBO/ha.d. (Mara D. , 2004). Éstas se pueden diseñar bajo el modelo de mezcla completa, en el cual se supone que las partículas de fluido afluente se dispersan instantáneamente a través de todo el volumen del reactor, por lo tanto, la concentración del efluente del reactor es la misma en cualquier punto de éste.

En las lagunas facultativas la capa aerobia (capa superior) y anaerobia (capa inferior) no son constantes, éstas interactúan entre sí y dependen de la radiación solar, por lo cual durante el día la zona aerobia es la que predomina en la laguna, recibiendo oxígeno de la actividad fotosintética de las algas y de reaireación que se presenta en la superficie, a través de la interfaz aire-agua; durante la noche es la capa anaerobia la cual predomina (Organización Panamericana de La Salud & Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2005) (Romero, 2005).

Las **lagunas de maduración o pulimento** son generalmente utilizadas como tratamientos terciarios; con el objetivo de eliminar patógenos, virus, parásitos y demás organismos perjudiciales. El tiempo de retención para una laguna está establecido como el tiempo teórico que tarda una partícula que entra a una unidad en salir de ella (Organización Panamericana de La Salud & Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2005); para las lagunas

de maduración es de mínimo 5 días y se relaciona con la remoción de *Coliformes fecales* (Romero, 2005) (Mara & F.), los cuales a su vez pueden estar en función de la temperatura; en algunos casos dicha remoción aumenta con el incremento de pH y disminuye a mayor concentración de DBO y mayor profundidad del agua (Stander & Meiring, 1965).

La **eficiencia** del sistema de tratamiento representa la relación de la capacidad real, frente a la teórica total de la unidad o equipo; siendo ésta expresada en porcentaje (%) (Organización Panamericana de La Salud & Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2005).

La **sedimentación** es el proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en su seno en suspensión, son removidas por la acción de la gravedad (Pérez, 2005). Estas partículas generan inconvenientes puesto que los sólidos suspendidos en las lagunas de estabilización se depositan en el fondo, formando una capa de lodo cuya acumulación genera impactos en el desempeño hidráulico de las unidades de tratamiento (Murphy, 2012) ; dichos impactos se deben a la disminución en el volumen efectivo de las lagunas y los cambios que se generan en el fondo de las mismas (Nelson, Jimenez, Tchobanoglous, & Darby, 2004). No obstante, la cantidad de lodos que se acumulan por efecto de la sedimentación suele variar, por la cantidad y naturaleza de los sólidos presentes en el agua (Totales, sedimentables, suspendidos (volátiles y fijos), disueltos (volátiles y fijos) y de la tasa de descomposición del residuo sedimentado (Sierra, 2011).

6.3. Marco Legal

El marco legal aplicable al proyecto se presenta a continuación.

Resolución 0631 de 2015 Vertimientos puntuales (parámetros y valores máximos permisibles), categoría de ganadería de porcinos-etapa de cría. Lo anterior se contempla teniendo en cuenta que se realice vertimiento puntual del efluente a un cuerpo hídrico superficial.

Resolución 1207 de 2014 Uso de aguas residuales tratadas. Se contempla debido al reúso del efluente de las lagunas en riego de praderas (cultivo de pastos y forrajes para consumo animal).

Resolución 1096 de 2000: Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000)-Sección II, título E. Sistema de tratamiento por lagunas de estabilización; incluye generalidades, tipos de lagunas, ubicación (dentro del sistema y respecto a poblaciones cercanas); ecología de los tipos de lagunas; así como elementos de diseño, funcionamiento y operación de estas; lo anterior brinda un referente técnico para evaluar el sistema de lagunaje objeto de estudio.

Para validar el cumplimiento de la normatividad ambiental para el efluente porcícola, es necesario realizar un comparativo entre los valores obtenidos a partir de la medición de los parámetros determinados y los valores máximos permisibles de la resolución 1207 de 2014, por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas tratadas y la resolución 0631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones; lo cuales se presentan en la *Tabla 1*.

Tabla 1.

Comparativo entre los parámetros a medir y los valores máximos permisibles para las resoluciones 1207 de 2014 y 0631 de 2015.

Parámetros	Unidad de medida	Resolución 1207 de 2014	Resolución 0631 de 2015	Nota:
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	Las
Conductividad	µS/cm	1.500,0	NA	
DBO		NA	450,00	
DQO	mg/L O ₂	NA	900,00	
SST	mg/L	NA	400,00	
<i>Salmonella sp.</i>		1,0		
<i>Enterococos fecales</i>	NMP/100mL	1,0*E(2)	NA	
<i>Coliformes termotolerantes</i>		1,0*E(+5)		

resoluciones 1207 de 2014 y 0631 de 2015, son aplicables al proyecto. Adaptado de: “Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible”. Resolución 1207 de 2014 y 0631 de 2015. NA: No aplica.

A continuación, se presenta la normatividad ambiental regional y sanciones instauradas a la Colonia Agrícola de Acacias Meta, por el proyecto productivo porcícola y el manejo de las aguas residuales:

Resolución No.130.015.03.125 de 2003 por la cual se otorga concesión de aguas para uso doméstico, más no pecuario.

Resolución No. 2.6.05.1051 de 2005, Expediente No. 5.11.03.012 se formulan pliego de cargos por no cumplir la **resolución No. 130.015.03.125 de 2003**, debido a: expiración del permiso y uso diferente al otorgado mediante la concesión.

Resolución No. 2.6.07.0859 de 2007 por la cual se sanciona y se exige suspender el vertimiento del efluente porcícola al Caño Cola de Pato; así mismo debe realizar mantenimiento a las estructuras del sistema de tratamiento de las aguas residuales.

7. Hipótesis

El sistema de tratamiento presenta una eficiencia inferior al 60% en temporada seca y húmeda, lo cual invalida el cumplimiento de la normatividad ambiental, según lo señalado en la resolución 1207 de 2014 establecida para reúso y 0631 de 2015 referente al vertimiento del efluente en el recurso hídrico.

8. Metodología

8.1. Área De Estudio

Las lagunas de estabilización objeto de estudio se encuentran ubicadas en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacías Meta, establecimiento perteneciente al Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario (INPEC); en el municipio del área de estudio; los meses con mayor régimen de lluvias son Abril, Mayo y Junio; la temperatura promedio se encuentra entre los 17 y 27°C correspondiente a clima cálido y húmedo (84% promedio de humedad), factores que inciden en la eficiencia de las lagunas de estabilización (Concejo Municipal de Acacías Meta, 2011).

8.2. Temporalidad Del Estudio

Los muestreos fisicoquímicos y microbiológicos se realizaron en dos intervalos de tiempo: de febrero a marzo y de abril a mayo del año 2017. (Periodo de sequía y lluvia respectivamente) períodos en los cuales se evaluó la eficiencia del sistema de lagunaje mediante muestreos *in situ* y en laboratorio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2016).

Para el desarrollo de la investigación se determinaron las siguientes fases:

FASE I Diagnóstico de la situación actual del sistema de tratamiento de lagunas de estabilización.

Mediante visitas de reconocimiento al área de estudio y entrevistas al personal que labora en el área de porcicultura, se identificó cada una de las fases de producción de cerdos y la infraestructura del sistema de lagunas de estabilización; lo anterior permitió desarrollar un diagnóstico general de la situación actual del sistema de tratamiento de las aguas residuales porcícolas, considerado desde el punto de generación del efluente.

FASE II Evaluación de la calidad del agua tratada

Caracterización fisicoquímica y microbiológica.

Para la caracterización fisicoquímica y microbiológica se realizaron mediciones *in situ* y en laboratorio de los parámetros ilustrados en la Tabla 2. Para los parámetros *in situ* se establecieron los puntos de toma de muestras: (1) Entrada del sistema; (2) salida de la laguna 1; (3) salida de la laguna 2; (4) salida total del sistema, ilustrados en la

Figura 2.

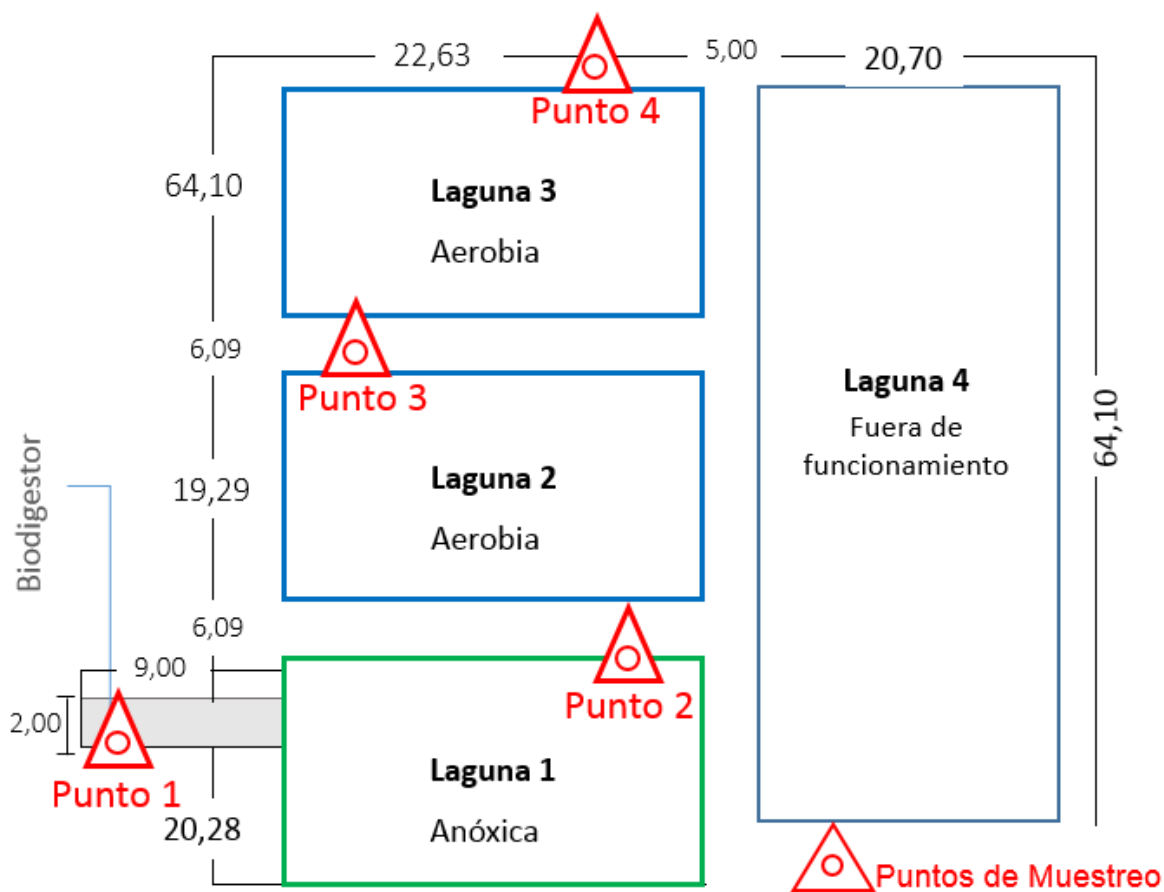


Figura 2. Distribución de las lagunas de estabilización objeto de estudio y los puntos de muestreo de agua residual en el sistema de tratamiento. Por: Cortés & Rodríguez, 2016. Elaborado a partir de versión gratuita del software AutoCAD para estudiante.

Tabla 2.

Variables a medir, métodos de análisis y sitio de muestreo.

Lugar de Medición	Variable	Unidad	Método / Técnica	Ubicación en el sistema	Frecuencia de muestreo (temporada seca y húmeda)	Referencia
<i>In situ</i>	Temperatura del agua	°C	Lectura directa		5 días en cada mes (febrero-marzo) y (abril-mayo) de las respectivas temporadas, en cada punto del sistema	Standard Methods
	pH	Unidad de pH	Electrométrico	1, 2, 3, 4		4500-H+-B
	Oxígeno disuelto	mg/L O ₂	Electrométrico			Standard Methods
	Conductividad	µS/cm	Electrométrico			2510-B
	Caudal	l/s	Volumétrico manual	1,4	3 días/mes	-
Laboratorio Tecno Ambiental	DBO	mg/L O ₂	Winkler	1,4	2 muestreos compuestos por temporada	SM 5210 B, SM 4500 O 0
	DQO		Reflujo cerrado			5220 C
	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	Gravimétrico	1,4		2540-D
Laboratorio Universidad Santo Tomás Loma Linda	<i>Salmonella sp</i>					-
	<i>Escherichia coli</i>					-
	<i>Enterococos fecales</i>	Presencia / Ausencia	Fermentación en tubos múltiples	1,4	1 vez en cada punto; dos replicas por punto	-
	<i>Coliformes termotolerantes</i>					-

Nota: Ubicación en el sistema: 1= entrada al sistema; 2= salida laguna 1 (entrada laguna 2); 3= salida laguna 2 (entrada laguna 3); 4= salida total del sistema. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.

A través de monitoreos en las distintas etapas del proceso de tratamiento en períodos de sequía y lluvia, se buscaba evaluar las eficiencias del sistema, para ello se realizaron 4 monitoreos compuestos (dos por temporada) de los parámetros DBO₅, DQO y SST en la entrada y salida del sistema de tratamiento.

Los muestreos de los parámetros microbiológicos se realizaron en la entrada y salida del sistema de tratamiento, posteriormente se analizaron las muestras en el laboratorio de microbiología ambiental la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio. Los resultados del estudio de los tubos y diluciones replicados se comunican en términos de Número Más Probable (NMP) de microorganismos existentes. Para efectos del presente trabajo, se realizó la prueba estándar para detección del grupo coliformes mediante la técnica de fermentación en tubos múltiples, con diluciones de hasta 10⁻⁵ tanto para la entrada, como para la salida del sistema de tratamiento mediante las fases: presuntiva (P₁), confirmativa (C₁) y complementaria (C₂), los resultados de los análisis de las muestras son reportados como Presencia-Ausencia (P-A) de coliformes; lo anterior, debido a las posibilidades actuales que brinda el laboratorio de microbiología de la universidad Santo Tomás; puesto que la implementación de dicho método requiere una validación previa para informar en número de células por volumen de muestreo analizado. Por otra parte, las variables DBO₅, DQO y SST fueron analizadas en el laboratorio Tecno Ambiental (certificado por el IDEAM) ubicado en la ciudad de Villavicencio - Meta.

Los parámetros *in situ* requirieron la toma de muestras puntuales en corridas de 8 horas, en el horario de 8 a.m., 10 a.m., 12 m., 2 p.m., 4 p.m. (Romero, 2005). El caudal fue tomado a las 8:00 a.m., 9:00 a.m., 10:00 a.m., 11:00 a.m., 12:00 m., 1:00 a.m., 2:00 p.m., 3:00 p.m., 4:00 p.m. en la entrada del sistema de tratamiento. Los sólidos sedimentables se midieron simultáneamente con el caudal, por el método volumétrico del cono Imhoff con muestras de 1 Litro de agua residual, la cual se dejaba sedimentar durante 45 minutos, pasado este tiempo con ayuda de un agitador de vidrio, se revolvía suavemente el agua y se dejaba en reposar por 15 minutos más, hasta completar una hora. Finalmente se obtenían 12 datos por día monitoreado.

Inicialmente se tenía previsto realizar mediciones de parámetros *in situ* en la columna de agua, sin embargo, no fue posible debido a la colmatación que presentan las lagunas; por lo cual, el


volumen de la lámina de agua disponible no era significativo para realizar muestreos y posterior análisis estadístico. Ante esto, se realizaron mediciones de oxígeno disuelto en cinco puntos aleatorios en la lámina de agua disponible de cada laguna, así mismo se midió la profundidad mediante una batimetría para conocer qué tipo de lagunas conformaban el sistema (en cuanto a contenido de oxígeno disuelto) y los volúmenes de lodo en cada piscina.

Los muestreos se realizaron según el protocolo de toma y preservación de muestras del IDEAM (1997).

Los equipos utilizados para los muestreos *in situ* fueron suministrados por la Universidad Santo Tomás, éstos y las variables medidas en campo se ilustran en la

Tabla 3.

Tabla 3.
Equipos utilizados en la medición de parámetros In situ.

Equipo Utilizado	Descripción
<p style="text-align: center;">a</p> 	<p>Medidor de Oxígeno disuelto</p> <p>Variables medidas en campo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Oxígeno disuelto.
<p style="text-align: center;">b</p> 	<p>Medidor de pH y conductividad</p> <p>Variables medidas en campo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH - Conductividad - Temperatura

Nota: a y b, equipos del laboratorio de aguas de la Universidad Santo Tomás Villavicencio. Adaptado de (Hanna Instruments Chile, 2017).

FASE III Procesamiento y análisis de la información recolectada

Cálculo de la Eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Porcícolas.

Para el cálculo de la eficiencia de remoción de DBO, DQO, SST, se utilizó el indicador:

$$\text{Eficiencia de Remoción (\%)} = \frac{[\text{Carga contaminante de entrada} - \text{Carga contaminante de salida}] * 100}{[\text{Contaminante de entrada}]}$$

Se realizó análisis estadístico descriptivo mediante la aplicación de estimativos estadísticos de tendencia central y dispersión para las variables *in situ*; de igual forma para las concentraciones promedio se utilizó la media aritmética ponderada, mediana y moda.

Por otra parte, para cada variable se determinaron las medidas de dispersión: varianza y desviación estándar, así como los valores máximos y mínimos. Con la información recolectada se construyeron gráficos de dispersión para cada variable que ilustran las diferencias presentadas en cada laguna en los tiempos anteriormente establecidos, con el fin de interpretar el funcionamiento actual del sistema de tratamiento.

Para efectos del análisis estadístico se empleó la técnica de rechazo de datos de desviación estándar, utilizando dicho valor como criterio de rechazo de datos extremos.

Para la comprobación de los datos se utilizó la prueba t-student, se estableció la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alterna (H_1), donde:

H_0 = El sistema de tratamiento presenta una eficiencia superior al 60% en temporada seca y húmeda, lo cual valida el cumplimiento de la normatividad ambiental, según lo señalado en la resolución 1207 de 2014 establecida para reúso y 0631 de 2015 referente al vertimiento del efluente en el recurso hídrico; y

H_1 = El sistema de tratamiento presenta una eficiencia inferior al 60% en temporada seca y húmeda, lo cual invalida el cumplimiento de la normatividad ambiental, según lo señalado en la

resolución 1207 de 2014 establecida para reúso y 0631 de 2015 referente al vertimiento del efluente en el recurso hídrico.

FASE IV Validar el cumplimiento de la normatividad ambiental de los parámetros obtenidos.

A partir de los resultados obtenidos en la fase II, se realizó una comparación con la resolución 1207 de 2014 (en cuanto a pH, conductividad, *Salmonella sp*, *Coliformes termotolerantes* y *Enterococos fecales*) y la resolución 0631 de 2015 (pH, DBO₅, DQO, SST) para verificar el cumplimiento de éstos con los valores máximos permisibles establecidos para el reúso o vertimiento de las aguas residuales porcícolas tratadas.

FASE V Evaluar el diseño actual de las lagunas de estabilización respecto a los referentes teóricos.

Para evaluar el diseño de las lagunas se tuvo en cuenta las dimensiones actuales y la cantidad de lodos existentes en cada piscina; para ello se realizó un levantamiento batimétrico donde previamente se determinaron tres perfiles longitudinales para cada laguna, espaciados cada perfil de forma transversal a una distancia de 1 metro, para obtener 9 perfiles transversales en todo el sistema; la medición de lodos se efectuó utilizando la técnica de la toalla blanca (Rivas, 2002)., con la cual se introdujo en cada piscina una barra de balsa de 2 metros de largo enrollada con una toalla blanca, en la cual quedaba la marca de los lodos existente en el fondo cada vez que ésta se introducía en el agua en los puntos donde se realizaron las mediciones. Para efectos de ratificar la validez de los valores obtenidos, se efectuaron dos repeticiones por punto en cada laguna, dejando un lapso una hora entre la primera y segunda medición.

De esta forma se pudo estimar los volúmenes de lodos acumulados en cada una de las lagunas y el volumen útil disponible en el sistema de tratamiento, esto permitió establecer que las lagunas se encontraban colmatadas. Los datos recolectados se almacenaron en formatos digitales para la elaboración de los gráficos en AutoCAD de los perfiles de sólidos sedimentados y para el cálculo de volúmenes acumulados. Sumado a esto se realizó el cálculo del tiempo de retención hidráulica

(TRH) de diseño de las lagunas, utilizando los datos de áreas y profundidades obtenidos en la batimetría.

Por otra parte se solicitaron datos de precipitaciones medias durante los años 2001 al 2016 de la estación 35010020 Acacias del IDEAM, con latitud $3^{\circ} 59' 40,7''$ N y longitud $73^{\circ} 45' 56,1''$ W y una elevación de 0525 m.s.n.m.; la cual se tuvo en cuenta por la cercanía al sistema de tratamiento objeto de estudio (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2014). Sin embargo, en los años 2012 y 2014 se evidenció falta de datos en la mayor parte de los meses.

Conocer acerca de la operación, mantenimiento y control de las lagunas es fundamental, puesto que estos factores inciden en la eficiencia de las mismas; para ello se realizaron entrevistas al personal interno y a los funcionarios encargados del área de porcicultura, con el fin de conocer los procedimientos y maniobras operativas llevadas a cabo tanto en el proceso productivo, como en el sistema de tratamiento de las aguas residuales. Inicialmente se tenía planteado realizar encuestas al personal que labora en el área porcícola, sin embargo, no se ejecutaron dichas encuestas debido a que el número de personas que tenía conocimiento de la información requerida era reducido (6), con lo cual, la muestra no era representativa para realizar un análisis estadístico de la información que se pretendía recolectar.

FASE VI Proponer alternativas que permitan mejorar el sistema de tratamiento.

Con la información obtenida, analizada y mediante la identificación de los efectos adversos directos e indirectos que se están generando en el entorno, se propusieron alternativas de mejoramiento del sistema de tratamiento de agua residual que fueran factibles de ejecutar por parte de la entidad. Para ello se tuvo en cuenta referencias bibliográficas de casos exitosos en la implementación de sistemas de lagunaje para el tratamiento de aguas residuales.

8.3. Flujograma Metodológico.

La

Figura 3 muestra el esquema metodológico planteado para el desarrollo del trabajo de grado titulado ‘Evaluación de la eficiencia del proceso de tratamiento de las aguas residuales porcícola

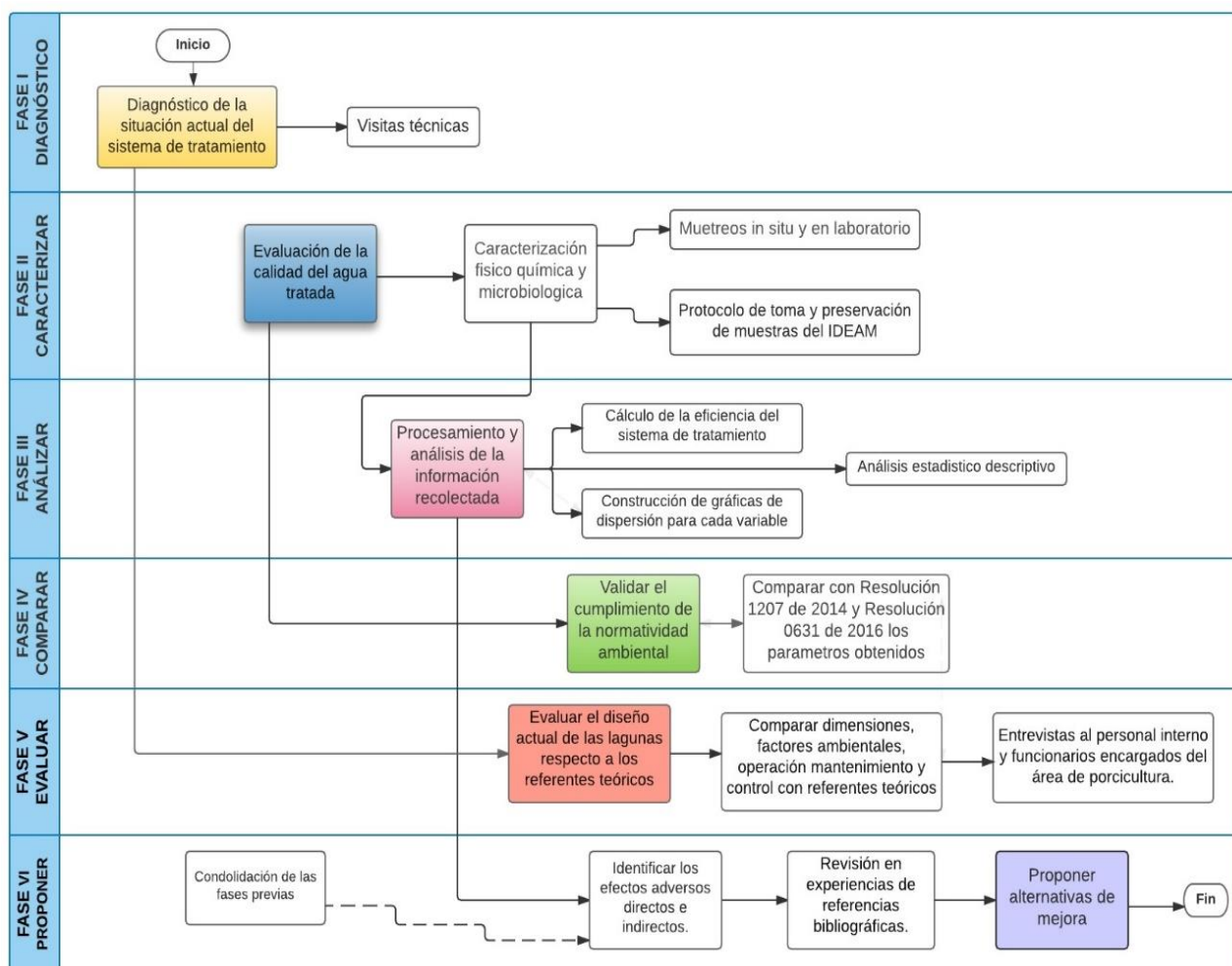


Figura 3. Describe el esquema metodológico programado para el desarrollo del trabajo de grado. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2016. A partir del software libre *Lucychart*.

9. Resultados

9.1. Diagnóstico de la Situación Actual del Sistema de Tratamiento de Lagunas de Estabilización

- **Sistema Productivo Porcícola.**

La Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacías Meta, implementa procesos productivos pecuarios en: piscicultura, lombricultura, avicultura, ganadería y porcicultura como estrategia práctica del proceso de resocialización que llevan a cabo las personas privadas de la libertad. En cuanto al proceso porcícola, el establecimiento penitenciario maneja un rango de producción mínima de 300 cerdos y máxima de 747; actualmente, cuenta con un total de 419 cerdos, divididos en las diferentes fases de producción ilustradas en la Tabla 4. El número de corrales y jaulas existentes es de 53: 3 de sanidad, 6 Jaulas de parto, 26 jaulas de lactancia, 8 corrales de gestación, 3 jaulas de pre cebo y 7 corrales de reproducción. Éstos cuentan con comederos automáticos y bebederos de chupo automático o tetina, para la respectiva alimentación de los porcinos. Dichas instalaciones, así como el proyecto productivo operan desde el año 1982.

Tabla 4.

Inventario de Cerdos			
Fases de Producción	Cantidad	Tipo de Alimentación	Duración por Etapa
Reproductores	2	Gestación	3 años vida productiva
Gestación	29		114 días

Parideras	1	Lactancia	21 días
Lactantes	6	Pre iniciador	
Pre-cebo	167	Iniciación	39 días
Levante y engorde	214	Levante y engorde	4 meses
Total	419	Agrinal	6 meses

Inventario de cerdos y requerimientos por fase de producción.

Nota: Agrinal, marca del alimento suministrado a los cerdos en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.

La producción porcina, en la Colonia Agrícola de mínima seguridad de Acacías, se realiza a partir de cuatro razas diferentes, las cuales se ilustran en la

Figura 4.



(a)



(b)



(c)

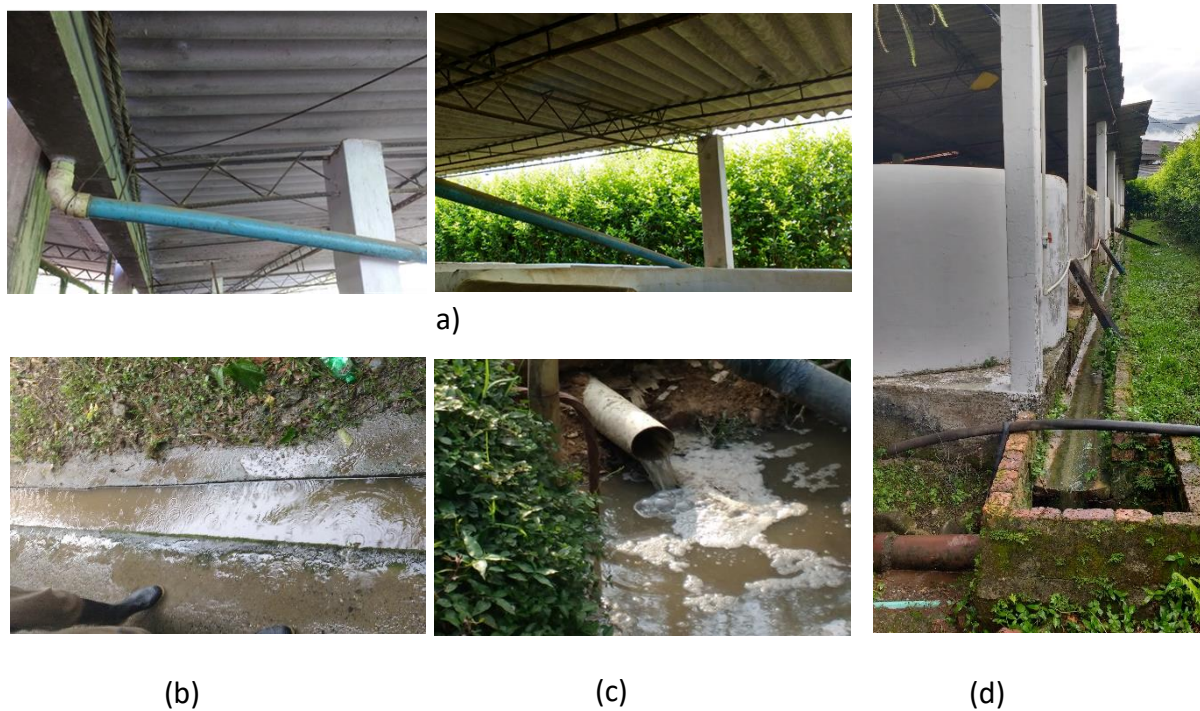


(d)

Figura 4. Fotografías de las razas de cerdos del sistema de producción porcícola de la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad: (a) Landrace, (b) Large White, (c) Duroc Jersey y (d) Pietrán. Por: Cortés & Rodríguez, 2017.

- **Instalaciones y condiciones operativas del proceso productivo.**

Los corrales, incluidos pisos y paredes son en concreto, presentan inclinación hacia el exterior de estos; el agua producto del lavado, es conducida por canales abiertos dispuestos a lo largo de las



áreas de producción; las tuberías en su mayor parte son de gres, la tubería que conduce el agua residual hasta el sistema de lagunaje es de 3 pulgadas (Son de 3 pulgadas las bajantes, las tuberías del sistema de alcantarillado son de 8 pulgadas) en PVC, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Fotografías del sistema de recolección y conducción de agua lluvia de la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad: (a) Canaletas, (b) canales abiertos, (c) entrada al sistema de tratamiento y (d) caja y tubería de gres Por: Cortés & Rodríguez, 2017.

El mantenimiento y limpieza de las instalaciones es realizado por el personal interno, bajo supervisión y control del personal de custodia y vigilancia de la entidad. El proceso de limpieza se realiza en dos momentos del día, en la mañana (8:00 am. a 9:00 am.) y en la tarde (3:00 pm. a 4:00 pm.); previamente se realiza un manejo de las excretas sólidas, retirándolas de forma manual del lugar, para posteriormente hacer el proceso para la obtención de abono.

A partir de lo anterior, se realiza el lavado, empleando dos mangueras y cepillos; finalizada la fase de destete, se realiza un lavado con agua, yodo y productos clorados en camas y pisos de esta zona. Para el control de olores se realizan aspersiones una vez al día tres veces por semana en pisos, camas, corrales y alrededor de las instalaciones empleando una mezcla de microorganismos eficientes (EM) (5%), melaza (5%) y agua limpia (90%) en un recipiente de cierre hermético.

- **Requerimientos normativos y legales.**

La explotación porcícola debe cumplir algunos requerimientos normativos y legales que serán exigidos por la autoridad ambiental, actualmente el establecimiento efectúa los trámites relacionados con la renovación de los permisos de concesión de agua para uso industrial (Resolución No. PS-GJ.1.2.6.016.0327) y de vertimiento de agua residual porcícola tratada mediante el sistema de lagunaje. Adicional a lo anterior, es necesario el trámite del **certificado de uso del suelo, plan de fertilización** (resolución 1023 de 2005) y control **de olores** (Art. 146. Resolución 1541 de 2013).

- **Descripción general de las condiciones de funcionamiento y operaciones unitarias actuales del sistema de lagunaje.**

El sistema de tratamiento consta de las siguientes estructuras:

Pretratamiento: el sistema de tratamiento no cuenta con un elemento para el cribado, por tal motivo ingresan al sistema residuos sólidos tales como guantes, jeringas, bolsas y sólidos de materia orgánica con diámetros de 1 cm o superiores, producto de los alimentos no digeridos por los cerdos, como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Muestra los sólidos de gran tamaño y residuos hospitalarios que ingresan al sistema de tratamiento en el agua residual del proyecto productivo porcícola en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad. Por: Cortés & Rodríguez, 2017.

Lagunas: el sistema está compuesto por cuatro lagunas, de las cuales actualmente solo operan tres en serie, la cuarta laguna se encuentra ubicada en paralelo a las tres anteriores, como se ilustra en la

Figura 2. El agua residual que recibe el sistema es producto de las deyecciones de los animales, el agua de lavado de los corrales, así como agua lluvia, debido a que el sistema de alcantarillado de evacuación de aguas residuales es en parte combinado con aguas lluvias (Agua lluvia de las Cubiertas del sistema productivo) ilustradas en la Tabla 6. Así mismo, en la laguna 1 se adicionan Microorganismos Eficientes (EM), para reducir malos olores, lodos y para obtener un efluente de mejor calidad en cuanto a: DBO₅, DQO, turbidez y disminución de sólidos suspendidos.

Cabe mencionar que no se tienen planos y documentos originales de diseño, en cuanto a dimensiones, profundidades y tiempos de retención hidráulica de cada laguna; tampoco se encontraron registros de muestreos de parámetros físicos, químicos o microbiológicos, ni datos de monitoreos de caudales de entrada y salida del sistema; sin embargo, se pudo establecer que no se ha realizado extracción de lodos en las lagunas desde su puesta en marcha en el año 1999 (18 años). Pese a lo anterior, con el desarrollo del presente trabajo se logró subsanar en gran medida esta dificultad, por medio del levantamiento de información realizado (ver *Tabla 19.*), del cual se presenta en la Tabla 5. de manera general las dimensiones de las lagunas.

Tabla 5.

Sistema de Tratamiento	
Laguna 1	Largo: 17,36 m. Ancho: 22,63 m.

	Área: 22,86 m ² Profundidad: 2 m. (Facultativa)
Laguna 2	Largo: 19,26 m. Ancho: 22,63 m. Área: 19,28 m ² Profundidad: 1,5 m. (aerobia)
Laguna 3	Largo: 20,26 m. Ancho: 22,63 m. Área: 14,61 m ² Profundidad: 1,5 m. (aerobia)

Dimensiones de las lagunas.

Nota: Datos obtenidos a partir de levantamiento de información realizado durante el desarrollo del presente trabajo. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.

Por otra parte, el efluente del sistema de tratamiento era utilizado para el riego de cultivos de pasto para consumo bovino, sin embargo, hace más de un año no se realiza dicho bombeo de agua, según información suministrada por el personal a cargo; debido al daño de la electrobomba utilizada para cumplir dicha función. Así mismo se evidenció deficiencias en el mantenimiento por presencia de gran cantidad de vegetación al interior y en los taludes de las lagunas, como se presenta en la Figura 7; en determinados momentos del día, al presentarse fuerte radiación solar, elevadas temperaturas y lluvias se generan olores ofensivos provenientes de la laguna 1.



Figura 7. Muestra la laguna 1 (anóxica) del sistema de tratamiento, la cual al momento de la realización de la fotografía se encontraba sin mantenimiento de poda de césped aledaño y extracción de vegetación al interior de la misma. Por: Cortés & Rodríguez, 2017.

9.2. Evaluación Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales De La Actividad Porcícola En La Colonia Agrícola De Acacias.

En el análisis de los datos asociados al sistema de tratamiento de aguas residuales, se realizaron para los parámetros fisicoquímicos, mediciones *in situ* y en laboratorio.

9.2.1. Parámetros *in situ*

A partir de la tabla 7 hasta la tabla 14 y desde la Figura 8 hasta la Figura 14 se presentan los resultados estadísticos y gráficos de las variables medidas *in situ*, en temporada seca y temporada húmeda, tales como:

- **Caudal**

El monitoreo del caudal del afluente líquido del sistema de tratamiento, permitió determinar que el caudal mínimo presentado fue 0,03 litros/seg, el máximo horario de 3 litros/seg, y a su vez el caudal medio fue 0,44 litros/seg. La Figura 8 muestra la variación media del caudal de entrada en corridas de 24 horas.

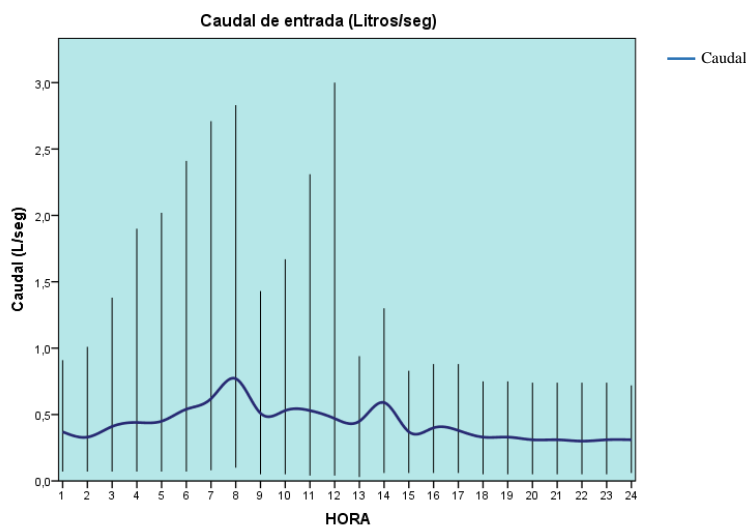


Figura 8. Describe el caudal horario de entrada del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

- **Sólidos Sedimentables**

La cantidad de sólidos sedimentables se estableció por el método volumétrico, mediante el uso del cono Imhoff, se obtuvo valores promedio de 12 horas, ilustrados en la Figura 9. Las líneas verticales representan los valores máximos y mínimos en la parte superior e inferior de cada una respectivamente, y la curva horizontal muestra las concentraciones promedio medidas en 12 horas del día (6 a.m. a 6 p.m.).

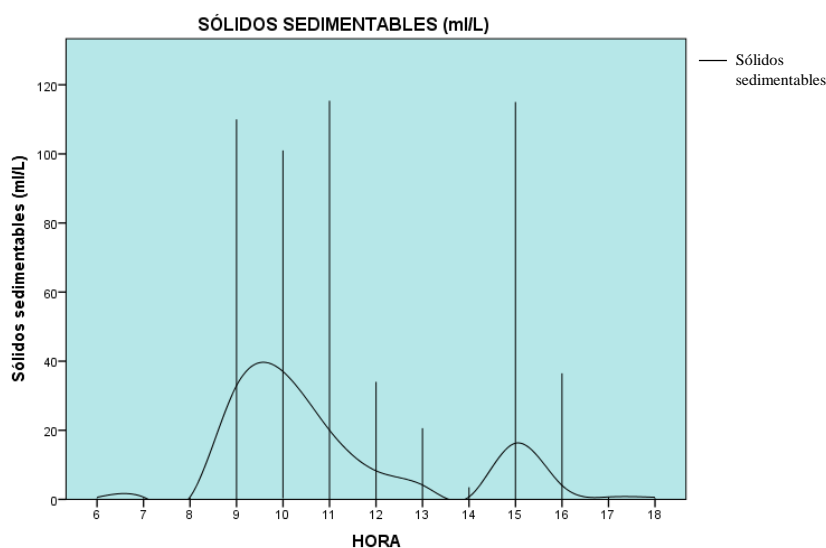


Figura 9. Muestra los sólidos sedimentables de entrada del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

De acuerdo a los datos presentados, el comportamiento de los sólidos sedimentables es mayor en las horas pico de lavado, alcanzando un máximo horario de 115,4 ml/L entre las 8 a.m. y 11 a.m. momentos en los cuales se realiza el mantenimiento y lavado de los corrales; los sólidos

sedimentables mínimos fueron de 0,08 ml/L y en promedio de 9,74 ml/L, en corridas de 12 horas (6 a.m. – 6 p.m.).

Inicialmente este parámetro no sería medido, pero debido a los valores batimétricos de las lagunas en donde se identificó la colmatación de las mismas y a la observación de los altos niveles de sólidos que poseía el agua residual se decidió medir, la Figura 10 muestra la medición de sólidos sedimentables realizada en campo mediante la técnica del cono Imhoff.



Figura 10. Muestra el Cono Imhoff durante la medición de sólidos sedimentables en la entrada del sistema de tratamiento. Por: Cortés & Rodríguez, 2017.

El origen de la alta concentración de los sólidos sedimentables radica en el alimento no digerido por los cerdos, representado por el alimento concentrado que se les suministra diariamente.

Asimismo, estos valores de sólidos sedimentables, asociado a los valores promedios de caudal, representan un aporte de sólidos de 10,94 m³/día, que son decantados en las lagunas, acelerando el proceso de colmatación.

El caudal máximo horario que se presentó en el sistema de tratamiento (3 litros/seg) se encuentra directamente relacionado con el aporte de aguas lluvias proveniente de las cubiertas que componen el sistema productivo porcícola. Este aporte diario de aguas lluvias al sistema de tratamiento es significativo, y no se considera viable debido a que es un sistema de tipo biológico, lo cual altera las características propias del agua residual y por ende la eficiencia del mismo. La Tabla 6., muestra el aporte de aguas lluvias en litros/día comparando el aporte entre la temporada seca y la temporada húmeda.

Tabla 6.

Aporte de aguas lluvias (litros/día) al sistema de tratamiento.

Cubiertas área producción porcícola					
Fases de producción	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m²) de las cubiertas de cada zona	Precipitación (litros/día) Temporada seca	Precipitación (litros/día) Temporada húmeda
Reproductores Gestación	40	6,5	260	167,18	549,64
Lactancia o paridera	21	6	126	81,01	266,36
Pre-cebo	16	10	160	102,88	338,24
Levante y engorde	26	9,2	239,2	153,80	505,66
Sanidad	14	12	168	108,02	355,15
Cuarentena	13,8	9,5	131,1	84,29	277,14
Bodega	40	6,5	260	167,18	549,64
Total	210,8	66,2	1604,3	1031,5	3391,5

Nota: El área de reproductores y gestación se encuentra ubicada de forma contigua y bajo la misma cubierta.
Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.

Estos datos permiten identificar que el aporte de agua residual respecto al caudal medio de entrada del sistema de tratamiento (34.624,5 litros/día) es alto, observándose que el aporte es superior en temporada húmeda (3.391,5 litros/día).

- **Temperatura**

La tabla 7 y tabla 8, muestran los resultados estadísticos de tendencia central de los datos de temperatura obtenidos en las dos temporadas.

Tabla 7.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable temperatura.

Temperatura (°C)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	24,36	26,04	27,12	26,77	26,73	24,51	26,66	28,23	28,28	27,65
Mediana	24,30	26,25	27,20	26,50	26,60	24,70	26,95	28,80	28,85	27,25
Moda	24,20	-	26,60	-	-	-	-	-	-	26,60
Varianza	0,10	0,71	0,60	1,33	1,14	0,89	1,28	10,22	14,29	1,48
Desviación estandar	0,32	0,84	0,78	1,15	1,07	0,94	1,13	3,20	3,78	1,22
Mínimo	23,90	24,60	25,90	25,20	25,40	23,00	24,10	21,40	21,10	26,20
Máximo	24,80	27,00	28,60	29,30	28,90	25,70	27,80	33,90	33,80	29,50
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	24,74	27,34	30,59	31,04	28,34	24,87	27,28	30,34	30,38	28,70
Mediana	24,35	27,05	29,85	30,25	28,00	24,70	26,85	30,25	30,20	28,45
Moda	25,70	-	-	33,10	27,30	-	25,50	-	-	-
Varianza	1,39	5,49	10,32	9,20	2,16	1,46	3,16	6,48	8,37	4,27
Desviación estandar	1,18	2,34	3,21	3,03	3,03	1,21	1,78	2,55	2,89	2,07
Mínimo	23,30	24,30	27,20	27,20	26,90	23,00	25,50	26,90	25,20	25,90
Máximo	26,70	32,30	37,30	36,50	30,80	26,80	31,00	35,20	34,00	31,90

Tabla 8.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable temperatura.

Temperatura (°C)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	24,96	25,91	26,24	26,28	26,16	26,63	27,23	30,03	29,03	28,22
Mediana	25,20	25,40	25,90	26,20	25,60	26,45	27,10	29,50	30,40	27,70
Moda	25,90	25,20	25,50	-	-	26,60	-	26,80	-	29,20
Varianza	0,76	1,22	3,26	1,47	1,32	1,00	2,38	8,99	4,45	3,66
Desviación estandar	0,87	1,11	1,81	1,21	1,15	1,00	1,54	3,00	2,11	1,91
Mínimo	23,30	24,70	22,60	24,80	24,90	25,20	25,20	26,70	26,50	26,00
Máximo	25,90	27,80	28,40	27,80	27,90	28,40	30,20	34,10	31,50	32,40
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	25,47	26,87	30,84	30,60	28,91	25,87	27,58	31,11	30,55	28,62
Mediana	25,8	26,4	31,3	31,2	28,4	25,85	27,35	32,3	30,25	28,15
Moda	26,6	26,3	27,3	-	-	25,3	-	-	-	26,4
Varianza	1,36	4,08	9,71	12,41	5,35	1,85	6,27	10,81	12,09	6,09
Desviación estandar	1,17	2,02	3,12	3,52	3,52	1,36	2,50	3,29	3,48	2,47
Mínimo	23,6	23,4	27,3	26,4	26,3	23,8	24,9	27,2	26,6	25,2
Máximo	26,6	30,1	34,6	37,2	32,2	28,6	33,2	35,1	36,3	32,7

En las lagunas de estabilización para la temporada seca, la mayor temperatura registrada fue 37,30°C al medio día en la salida de la laguna 2, la temperatura mínima fue 21,10°C en la salida de la laguna 1 a las 2 p.m.; la desviación estándar ilustra diferencias poco significativas entre los puntos de muestreo; la varianza no presenta valores elevados, siendo 14,29 el dato más alto y 0,10 el más bajo; la moda oscila entre los 25 y 27,3°C (excepto 33,10°C presentado en la laguna 2 a las 2 p.m.) la mediana representa valores similares a los valores medios.

Por otra parte en las piscinas para la temporada húmeda, la mayor temperatura fue 37,2°C a las 2 p.m. en la laguna 2, la temperatura mínima fue 22,60°C en la entrada del sistema a las 12 m.; la desviación estándar ilustra diferencias significativas entre los puntos de muestreo, la varianza no presenta valores altos, siendo 12,41 el dato más alto; los valores modales se presentan entre los 25 y 27,3°C (excepto 29,20°C presentado en la laguna 1 a las 4 p.m.) la mediana ilustra valores similares a los valores medios. La t student para la variable temperatura en cada temporada, indicó que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los datos de los puntos muestreados, lo anterior dado que presentaron valores P más pequeños de 0,000 demostrando la importancia significativa entre éstos.

La figura 11, muestra las variaciones de la temperatura en cada laguna en las horas de medición establecidas (8 a.m., 10 a.m., 12 m., 2 p.m. y 4 p.m.), dichas variaciones en compañía de factores como el pH y la intensidad lumínica controlan la cantidad de los microorganismos y la actividad que éstos desarrollan en las lagunas facultativas (Romero, 2005).

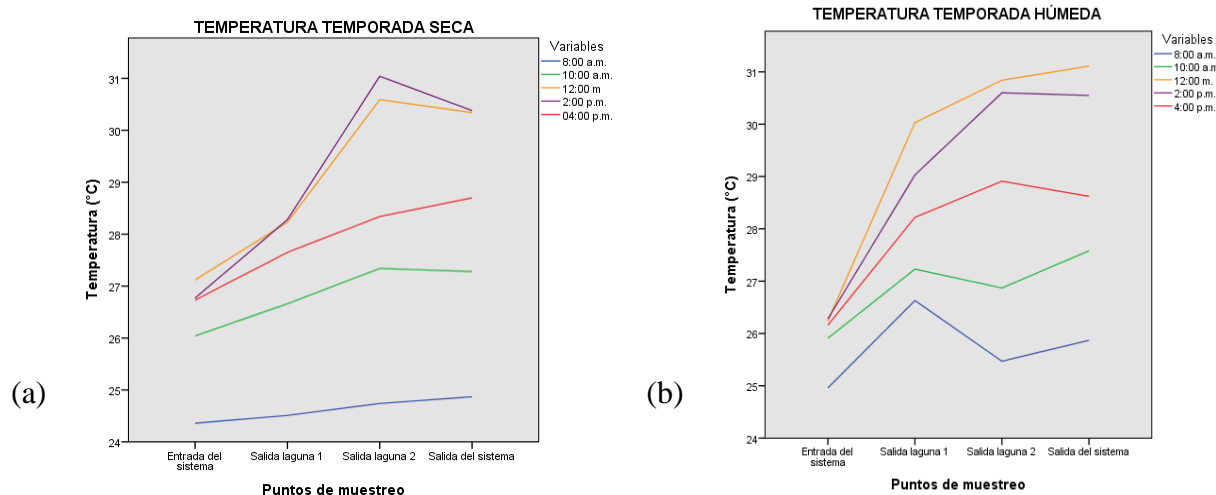


Figura 11. Variación de la temperatura en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, licencia de la Universidad Santo Tomás.

Las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren en las lagunas se ven influenciadas por la temperatura y radiación solar que afectan los procesos biológicos ocurridos dentro de las lagunas; en las lagunas del sistema de tratamiento para la temporada seca, la figura 11, muestra una variación media en la temperatura entre 2 y 4°C a las 8 a.m., 10 a.m. y 4 p.m.; en la laguna 2 a las 12 m. y 2 p.m. asociado a cuando se registró mayor intensidad del brillo solar, alcanzando un nivel máximo de temperatura en el agua de 31°C, lo cual favorece la desinfección y la biodegradación de materia orgánica, dado que la temperatura es superior a los 20°C. (Durán, 2009). En la entrada y en la laguna 1, esta variable presenta mayor influencia por el nivel de temperatura con que llega el agua residual al sistema, mientras que los tiempos de retención y la incidencia solar modifican las temperaturas en las lagunas posteriores (Romero, 2005). En este caso, las lagunas 2 y 3.

Para la temporada húmeda, en la figura 11 la mayor temperatura registrada fue 31,11°C al medio día en la salida de la laguna 2, una mínima de 24,96°C a las 8 a.m. en la entrada del sistema; las temperaturas obtenidas a lo largo del estudio muestran un comportamiento propio de las lagunas facultativas, favoreciendo los procesos de degradación llevados a cabo por los microorganismos;

para la temporada seca y húmeda la variación de la temperatura es óptima (entre 20 y 30°C); temperaturas en las cuales la tasa de fotosíntesis no cambia significativamente, aportan a la eficiencia que tiene el sistema de tratamiento, siendo este parámetro importante ya que la actividad bacteriana, a temperaturas menores que la óptima aumentan o retardan el proceso de degradación de la materia orgánica (Romero, 2005).

- **pH**

La Tabla 9. y Tabla 10. muestran los resultados estadísticos de tendencia central de los datos de pH obtenidos en las dos temporadas.

Tabla 9.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable pH.

pH (Unidades de pH)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	8,26	8,53	8,14	8,24	8,19	7,41	7,33	7,42	7,21	7,29
Mediana	8,31	8,64	8,28	8,39	8,36	7,37	7,25	7,41	7,29	7,34
Moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianza	0,12	0,10	0,19	0,36	0,29	0,09	0,10	0,28	0,40	0,19
Desviación estandar	0,35	0,32	0,44	0,60	0,54	0,30	0,32	0,53	0,63	0,44
Mínimo	7,45	7,74	7,28	7,18	7,25	6,98	6,52	6,52	5,73	6,57
Máximo	8,61	8,79	8,56	8,94	8,77	7,81	7,79	8,41	7,76	7,84
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	8,08	8,21	7,96	8,14	8,21	3,00	8,29	8,16	8,16	8,43
Mediana	8,18	8,26	7,91	8,51	8,60	8,32	8,35	8,27	8,06	8,59
Moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianza	0,27	0,35	0,26	0,25	0,33	0,33	0,29	0,59	0,41	0,39
Desviación estandar	0,52	0,59	0,75	0,81	0,76	0,57	0,72	0,77	0,64	0,62
Mínimo	7,44	7,49	6,72	6,79	6,89	7,28	7,27	7	7,27	7,27
Máximo	8,71	8,92	8,93	8,89	8,84	8,88	9,09	9,08	9,09	9,06

Tabla 10.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable pH.

pH (Unidades de pH)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	7,53	7,44	7,08	7,12	7,50	6,81	6,40	6,28	6,27	6,52
Mediana	7,45	7,57	7,17	6,98	7,58	6,73	6,67	6,47	6,66	6,68
Moda	-	-	-	6,80	7,46	-	-	6,68	6,68	-
Varianza	0,40	0,18	0,15	0,30	0,25	0,08	0,31	0,26	0,36	0,41
Desviación estandar	0,64	0,43	0,39	0,54	0,50	0,28	0,56	0,51	0,60	0,64
Mínimo	6,76	6,57	6,50	6,16	6,33	6,6	5,46	5,46	5,28	5,31
Máximo	8,87	7,88	7,78	7,87	8,04	7,53	6,81	6,82	6,82	7,68
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	7,16	7,16	7,00	6,93	6,98	3,00	7,20	7,34	7,17	7,40
Mediana	7,18	7,25	7,22	7,09	7,18	7,30	7,16	7,46	7,26	7,63
Moda	7,18	-	-	7,13	-	-	-	-	-	-
Varianza	0,09	0,21	0,16	0,16	0,17	0,17	0,15	0,29	0,37	0,38
Desviación estandar	0,30	0,46	0,50	0,44	0,42	0,35	0,41	0,54	0,61	0,62
Mínimo	6,6	6,32	6,12	6,38	6,14	6,76	6,5	6,35	6,15	6,24
Máximo	7,73	7,78	7,54	7,54	7,34	8,1	7,79	7,98	7,9	8,14

Las lagunas de estabilización en la temporada seca, registraron un pH máximo de 9,09 unidades en la salida del sistema y un pH mínimo de 6,52 unidades en la salida de la laguna 1; la desviación estándar muestra que la separación entre los datos es en promedio 0,47 para los cuatro puntos de muestreo; la varianza presenta valores pequeños indicando que existe poca diferencia respecto a la media, a su vez para esta temporada, no se presentaron valores modales en ninguno de los puntos de muestreo; la mediana ilustra un comportamiento cercano de los datos.

En la temporada húmeda se presentó un pH máximo de 8,87 unidades, un mínimo de 5,28 unidades; 6,80 - 7,46 - 6,68 - 7,18 y 7,13 unidades son los valores modales en la entrada del sistema, salida de la laguna 1 y salida de la laguna 2; la varianza y la desviación estándar muestran diferencias poco significativas respecto a la media. El análisis t student para los datos de pH en cada temporada, indicó que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los datos, lo anterior dado que presentaron valores P más pequeños de 0,000 demostrando la importancia significativa entre ellos.

La Figura 12 muestra las variaciones medias del pH en cada laguna, en las horas de medición establecidas (8 a.m., 10 a.m., 12 m., 2 p.m. y 4 p.m.), así como los valores máximos y mínimos establecidos por las resoluciones 0631 de 2015 y 1207 de 2014 (línea negra punteada).

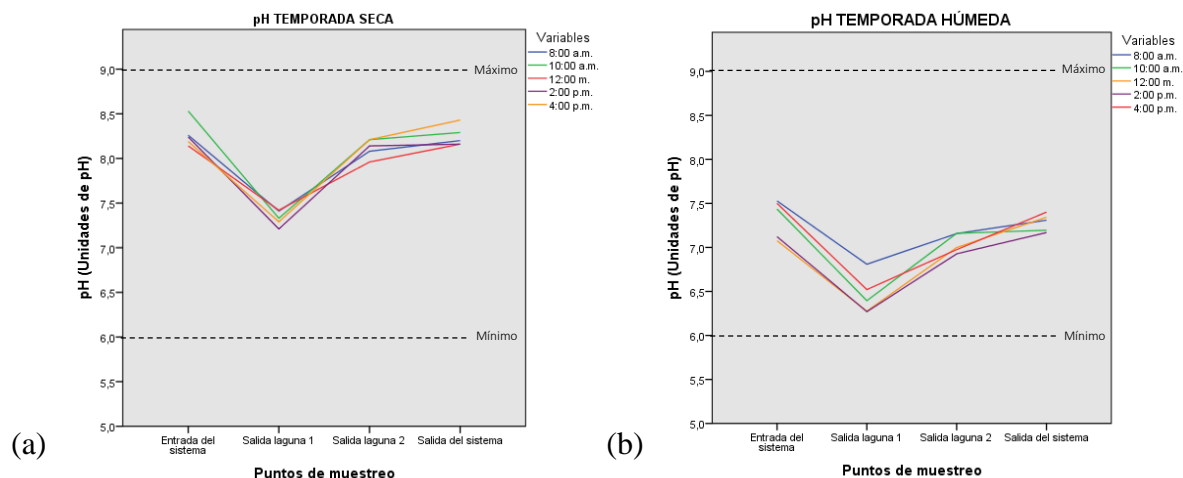


Figura 12. Variación media del pH en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

En la temporada seca el valor medio de pH fue 8,21 unidades, registrando un mínimo de 7,21 y un máximo de 8,53 unidades en las diferentes horas del día, estos valores se deben a que la actividad fotosintética demanda un elevado consumo de CO_2 por las algas, adicionalmente el uso de carbono, a partir del ión bicarbonato y la producción del ión hidroxilo OH^- provocan periodos de pH elevados en las lagunas aerobias y facultativas. En general el pH de las lagunas porcícolas se mantiene entre 7 y 8,5 unidades, a pH mayor a 8,5 unidades, se presenta mortalidad bacteriana en las lagunas de estabilización, afectando el proceso biológico que se desarrolla al interior de estas (Romero, 2005); otro factor que puede influenciar el pH es la transformación del nitrógeno orgánico, a partir de los contenidos de nitrógeno presentes en las excretas porcinas (e.g. proteínas), éstas pueden contribuir en elevar los valores de pH, hasta niveles de alcalinidad (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011). Lo anterior ratifica un buen comportamiento del pH en las lagunas dado que estos valores no sobrepasan las 8,5 unidades, evidenciando valores normales que presentan este tipo de sistema de tratamiento.

El sistema de tratamiento presenta variaciones significativas en la laguna 1, respecto al pH que se maneja en las lagunas 2 y 3, esto se atribuye al proceso de degradación anaerobia en la fase acidogénica que se presenta en la laguna 1, (Matsumoto & Sánchez, 2016) dado que esta laguna es la que recibe la mayor carga contaminante.

En la temporada húmeda el comportamiento del pH es similar al de la anterior temporada, en la laguna 1 existe una disminución respecto a los pH de las piscinas 2 y 3, probablemente obedeciendo a un proceso de desnitrificación (anóxico) y en presencia de carbono orgánico, donde anteriormente el nitrato es reducido a nitrito y posteriormente a nitrógeno gas a través de la acción de bacterias heterótrofas facultativas (Rodríguez, 2011).

Sin embargo, los valores de este parámetro fueron inferiores respecto a la temporada seca, el pH mínimo fue de 6,27 unidades en la laguna 2 a las 2 p.m., el máximo 7,53 unidades en la entrada del sistema a las 8 a.m. con un valor medio de 7,03 unidades.

En general en las lagunas 2 y 3 se presenta un aumento progresivo del pH, registrando valores promedio de 8,12 y 7,03 unidades en temporada seca y húmeda respectivamente, debido a los intensos procesos fotosintéticos propios de las lagunas facultativas. En las dos temporadas los valores medios de pH cumplen con los parámetros máximos establecidos en la resolución 0631 de 2015, para el vertimiento de las aguas residuales tratadas, así como la resolución 1207 de 2014, sin embargo, hubo mediciones puntuales en donde los valores de pH superan las normas, específicamente a las 10.00 a.m., 12:00 m., 2:00 p.m. y 4:00 p.m.

- **Oxígeno Disuelto:**

La tabla 11 y tabla 12 muestran los resultados estadísticos de tendencia central de los datos de Oxígeno disuelto obtenidos en las dos temporadas.

Tabla 11.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable oxígeno disuelto.

Oxígeno disuelto (ppm)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	2.92	3.22	2.61	1.94	3.19	2.08	3.29	3.12	2.16	2.45
Mediana	2.41	2.43	2.87	2.19	2.24	2.26	3.41	3.28	2.27	2.19
Moda	-	-	-	-	5.54	-	-	-	-	-
Varianza	2.36	3.11	0.74	1.01	2.91	0.82	2.74	1.56	0.78	0.56
Desviación estandar	1.54	1.76	0.86	1.01	1.71	0.91	1.66	1.21	0.88	0.75
Mínimo	1.09	1.86	1.39	0.36	1.59	1.16	1.38	1.40	1.15	1.40
Máximo	5.57	6.96	3.61	3.08	5.54	3.45	5.15	5.11	3.80	3.37
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	3.35	4.84	3.97	4.55	3.03	3.85	3.90	4.03	5.27	4.73
Mediana	3.45	4.90	4.13	4.46	2.47	3.76	4.54	4.45	6.19	5.40
Moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianza	4.05	2.92	1.69	3.85	3.52	0.85	2.12	1.67	3.51	5.41
Desviación estandar	2.01	1.71	1.30	1.96	1.88	0.92	1.46	1.29	1.87	2.33
Mínimo	1.22	1.94	1.64	1.06	1.22	2.16	1.40	1.53	2.42	1.82
Máximo	5.57	6.96	3.61	3.08	5.54	3.45	5.15	5.11	3.80	3.37

Tabla 12.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable oxígeno disuelto.

Oxígeno disuelto (ppm)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	4,71	4,80	4,94	4,45	5,05	3,84	3,12	3,90	3,34	3,32
Mediana	5,04	4,90	4,87	4,03	5,23	3,66	3,35	4,34	3,68	2,87
Moda	-	-	-	-	-	-	-	2,54	-	-
Varianza	4,08	3,64	4,65	7,21	3,54	1,07	0,89	2,96	1,97	1,92
Desviación estandar	2,02	1,91	2,16	2,68	1,88	1,03	0,94	1,72	1,40	1,39
Mínimo	1,70	2,02	2,71	1,04	2,07	2,43	1,40	1,19	1,31	1,76
Máximo	7,30	7,05	7,29	7,18	6,84	5,77	4,18	6,63	4,83	5,25
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	5,25	6,44	7,13	5,25	4,26	3,41	4,69	3,66	3,52	4,81
Mediana	6,08	6,44	7,13	6,34	4,73	2,83	4,99	2,42	3,54	5,39
Moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianza	5,48	5,97	6,90	7,11	3,40	2,84	4,59	7,22	4,31	3,9
Desviación estandar	2,34	2,44	2,63	2,67	1,84	1,69	2,14	2,69	2,08	1,98
Mínimo	1,34	6,44	7,13	1,34	1,41	1,46	1,44	1,20	1,21	1,76
Máximo	7,33	6,44	7,13	6,97	6,37	5,94	6,78	6,93	6,42	6,62

El comportamiento del oxígeno disuelto se encuentra directamente relacionado con la temperatura del agua que varía en horas diurnas y nocturnas dada la influencia de la radiación solar en la actividad fotosintética. Para efectos de este estudio, se evaluaron horarios diurnos debido a la restricción de ingreso al establecimiento penitenciario en horarios nocturnos. En la temporada seca el oxígeno disuelto máximo presentado fue 7,28 ppm, el mínimo 0,36 ppm a las 2:00 p.m.; la desviación que presentan los datos en su distribución está representada por valores cercanos a la media, indicando poca variación entre estos; 5,54 fue el único valor modal que se presentó de oxígeno disuelto en esta temporada a las 4:00 p.m.

En temporada húmeda el valor máximo de oxígeno disuelto registrado en el sistema de tratamiento fue 7,33 ppm en la salida de la laguna 2 a las 8:00 a.m., La concentración mínima fue 1,04 ppm en la entrada del sistema a las 2:00 p.m.; la desviación estándar y la varianza ilustran diferencias poco significativas respecto a la media, en esta temporada 2,54 fue el único valor modal presentado. Los datos no presentan diferencias significativas en lo que corresponde al sistema

lagunar; la *t* student para los datos de oxígeno disuelto en cada temporada indicó que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los datos, presentando valores *P* entre 0,001, 0,002 y 0,005 demostrando la importancia significativa entre los mismos.

La Figura 13 muestra las variaciones del oxígeno disuelto en cada laguna, en las horas de medición establecidas (8 a.m., 10 a.m., 12 m., 2 p.m. y 4 p.m.).

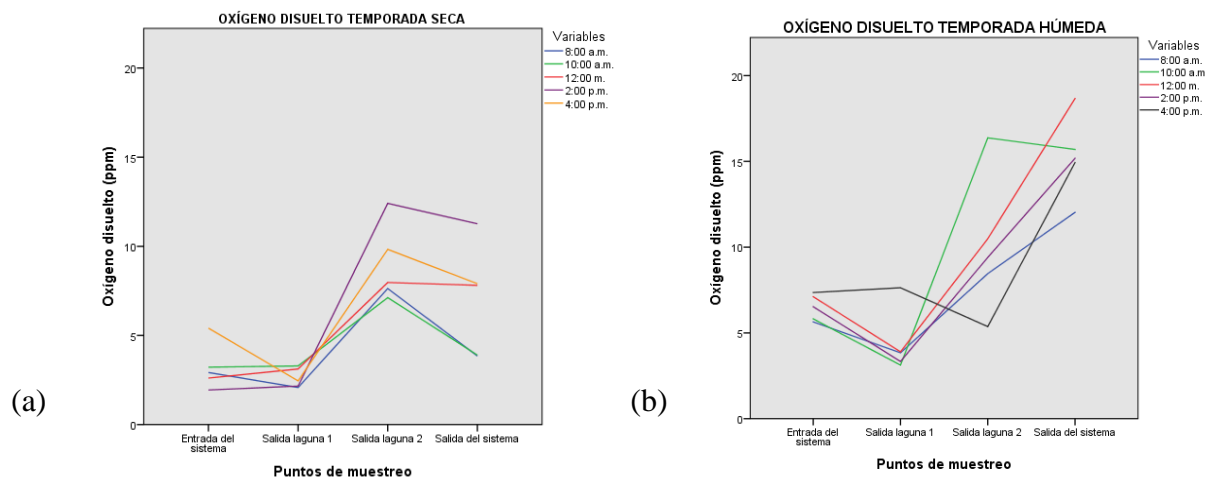


Figura 13. Presenta la variación del oxígeno disuelto en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

En la temporada seca la cantidad máxima de OD fue 7,28 ppm. El valor mínimo fue 1,94 ppm presentados en la laguna 1, al haber mayor consumo de oxígeno por efecto de la degradación de la elevada carga de materia orgánica en esta laguna. En la laguna 2 y 3 se encuentran los niveles máximos de oxígeno disuelto debido a la actividad fotosintética (Goyenola, 2007).

Las concentraciones de oxígeno disuelto en la temporada húmeda presentan un comportamiento distinto al de la temporada anterior; en la entrada del sistema la cantidad de oxígeno disuelto se mantiene entre las 4 y 5 ppm, en la laguna dos se observa una disminución de oxígeno disuelto a las 4 de la tarde, el oxígeno es similar a la entrada del sistema cuando la radiación solar y la actividad fotosintética disminuyen, por otra parte las concentraciones de oxígeno en la laguna 2 va aumentando conforme pasa a la laguna 3, concentraciones que oscilan entre 4 y 7,3 ppm, siendo estas dos lagunas donde se presenta mayor actividad bacteriana.

- **Conductividad:**

La Tabla 13. y Tabla 14. muestran los resultados estadísticos de tendencia central de los datos de conductividad obtenidos en las dos temporadas.

Tabla 13.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada seca, para la variable conductividad.

Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	1923,2	1559,3	1545,4	1487,7	1331,5	1269,8	1452,0	1480,8	1397,1	1508,9
Mediana	1822,1	1586,5	1372,8	1110,7	1390,0	1287,8	1462,5	1563,1	1420,4	1408,7
Moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianza	526139,9	314875,7	523796,2	672059,9	378426,2	92208,6	73932,1	446614,3	115915,2	129205,2
Desviación estandar	725,4	561,1	723,7	819,8	615,2	303,7	271,9	668,3	340,5	359,5
Mínimo	956,3	694,2	489,8	569,4	653,6	1469,5	1088,9	1088,9	1088,9	775,3
Máximo	2893,8	2212,1	2925,0	3120,0	2159,0	1687,9	1806,5	2542,8	1826,8	2042,0
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	1227,9	1219,7	1180,3	1117,2	1430,3	1023,7	996,2	910,1	1227,4	973,0
Mediana	1185,6	1378,3	1379,0	1316,6	1313,5	1130,2	1031,9	850,2	1254,2	1099,8
Moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianza	122232,4	166945,3	161857,8	193230,2	653903,8	77133,7	97535,0	93724,0	218620,5	104750,8
Desviación estandar	349,6	408,6	402,3	439,6	808,6	277,7	312,3	306,1	467,6	323,7
Mínimo	616,2	488,3	475,8	488,3	494,5	577,2	577,2	525,7	698,9	436,8
Máximo	1595,9	1594,3	1533,5	1599,0	3260,4	1355,6	1358,8	1297,9	2265,1	1344,7

Tabla 14.

Resultados estadísticos de tendencia central de la temporada húmeda, para la variable conductividad.

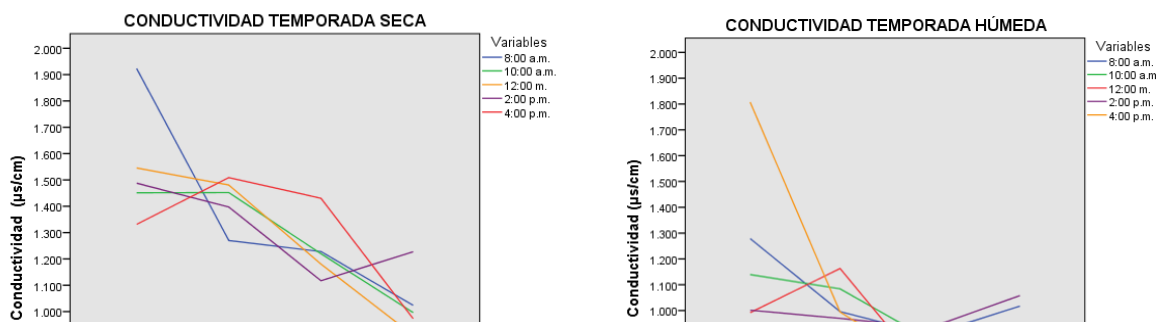
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)										
Punto de muestreo	Entada al sistema					Salida laguna 1				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	1278.65	1139.37	992.04	1001.33	1807.75	996.06	1084.20	1162.73	969.76	994.05
Mediana	1272.96	954.72	971.88	787.80	1617.72	991.38	1116.96	1181.70	978.18	921.32
Moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianza	103717.87	635321.72	273343.14	189934.20	1526139.76	111180.09	188614.04	228189.88	240868.24	305544.54
Desviación estandar	322.05	797.07	522.82	435.81	1235.37	333.44	434.30	477.69	490.78	552.76
Mínimo	699.00	18.01	274.56	462.00	492.00	699.00	699.00	699.00	699.00	699.00
Máximo	1650.00	2645.76	1580.28	1629.00	3116.88	1452.36	1903.20	1998.36	1595.88	1812.72
Punto de muestreo	Salida laguna 2					Salida del sistema				
Hora	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.	8:00 a.m.	10:00 a.m.	12:00 m.	2:00 p.m.	4:00 p.m.
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	906.31	886.55	741.88	933.32	777.27	1017.18	927.73	740.57	1058.26	645.14
Mediana	828.36	905.58	598.74	1099.80	561.00	968.76	786.24	777.44	940.68	549.12
Moda	-	-	-	-	-	-	-	867.36	-	-
Varianza	165182.96	152865.99	109211.13	156304.51	162947.42	251654.80	354337.58	45450.45	333070.86	67311.92
Desviación estandar	406.43	390.98	330.47	395.35	403.67	501.65	595.26	213.19	577.12	259.45
Mínimo	490	430	442	456	361	403	403	381	522	369
Máximo	1400.88	1382.16	1209	1371.24	1335.36	1765.92	2023.32	1040.52	2346.24	987.48

En el sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas, la conductividad en la temporada seca presenta un valor máximo en la entrada del sistema de 3120 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a las 2:00 p.m. lo cual se encuentra directamente relacionado con la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua residual que ingresan al sistema de tratamiento debido al contenido de sales producto de las excretas sólidas, líquidas y del alimento de los cerdos (Oliver & Faz , 2009) (Báscones, 2001); por otra parte, la conductividad mínima fue 436,8 $\mu\text{s}/\text{cm}$, en la salida del sistema a las 4:00 p.m.; la desviación estándar respecto a la media presenta poca variación, así mismo para esta temporada no se presentaron valores modales; la varianza de los datos es alta (valor máximo 672059,9 en la entrada del sistema a las 2:00 p.m.); los valores medios muestran un comportamiento mayor en la entrada del sistema, respecto a los valores de la salida del mismo.

La conductividad máxima en la temporada húmeda fue 3116 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la entrada del sistema a las 4:00 p.m., el valor mínimo presentado fue 18,01 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la entrada del sistema a las 10:00 a.m., ocurrido en evento de alta precipitación, teniendo en cuenta que el sistema de tratamiento es mixto (recibe aguas lluvias y aguas residuales) y diluye las concentraciones elevadas de conductividad que normalmente se presentan en este punto de muestreo; la varianza y la desviación estándar ilustran cambios significativos entre los datos, la mayoría de estas variaciones se presentaron principalmente por eventos de precipitación en la zona de estudio, 867,36 fue el único valor modal que se presentó en esta temporada a las 2:00 p.m. en la salida del sistema; el comportamiento de la media es similar al de la temporada anterior, sin embargo, estas concentraciones son menores.

Los datos de conductividad medidos en campo no presentan diferencias estadísticamente significativas en lo que corresponde al sistema lagunar, para lo cual la t student presentó valores P entre 0,001, 0,002 y 0,005 demostrando la importancia significativa entre los mismos.

La Figura 14 presenta el comportamiento medio de la conductividad en temporada seca y húmeda en las horas de medición establecidas (8 a.m., 10 a.m., 12 m., 2 p.m. y 4 p.m.), así como el valor máximo señalado por la resolución 1207 de 2014 (línea negra punteada).



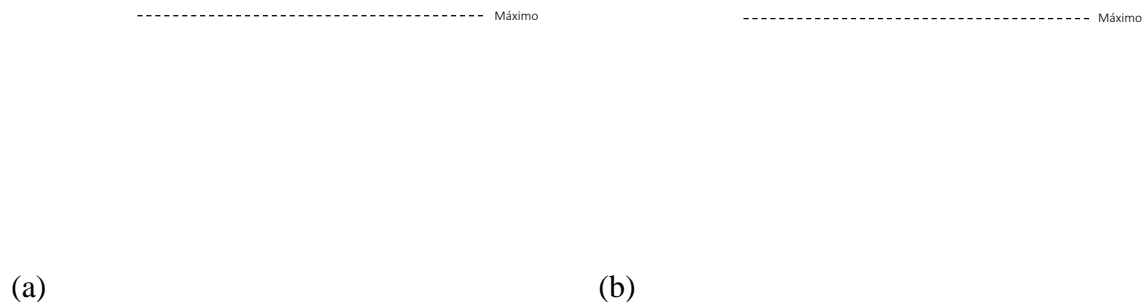


Figura 14. Presenta la variación de la conductividad promedio en el sistema de lagunaje en la temporada seca y húmeda. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

En la temporada seca se observa que los valores máximos de este parámetro ocurren a las 8:00 a.m. alcanzando un valor medio de 1900 $\mu\text{s}/\text{cm}$, momentos en los cuales se realiza el lavado de los corrales y donde las concentraciones de la conductividad son elevadas debido a la cantidad de sales producto del alimento que consumen los porcinos, donde la mayor parte de estas son expulsadas en la orina y las heces (Oliver & Faz, 2009) con altos contenidos de nitrógeno amoniacal y potasio (Báscones, 2001), éstos se diluyen con el agua e ingresan al sistema de tratamiento; a las 4:00 p.m. la conductividad varía con respecto a las otras horas monitoreadas, siendo mayor a las demás.

Así mismo, la gráfica muestra que las concentraciones de conductividad van disminuyendo a medida que el agua residual pasa por cada laguna, concentraciones que son diluidas con la precipitación de agua lluvia que le ingresa al sistema, sumado a los microorganismos presentes en el agua residual y aquellos que se adicionan como Microorganismos Eficientes (EM), los cuales consumen y secretan ácidos orgánicos, enzimas, antioxidantes y quelantes metálicos capaces de contribuir en la separación sólida/ líquida, como paso fundamental en el proceso de remoción de contaminantes del agua (Cardona & García, 2008); por otra parte, la temporada húmeda, presenta un comportamiento similar al de la temporada seca, sin embargo estos valores medios son menores ya que 3391,49 litros/día de aguas lluvias le ingresan al sistema de tratamiento; a las 12:00 p.m. el comportamiento es contrario respecto a las demás horas del día, ya que en la laguna 1, las concentraciones de la conductividad aumentan mientras las demás disminuyen. En general para las dos temporadas, la conductividad media en el sistema de tratamiento cumple con los parámetros máximos permisibles establecidos en la Resolución 1207 de 2014, reusó de las aguas residuales industriales tratadas.

9.2.2. Parámetros En Laboratorio.

- **Microbiología**

Para cada temporada (húmeda y seca) se realizaron duplicados de muestras puntuales en entrada y salida del sistema. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 15. Dichos resultados son otorgados como presencia o ausencia de cada parámetro analizado en el laboratorio de microbiología Ambiental de la Universidad Santo Tomás.

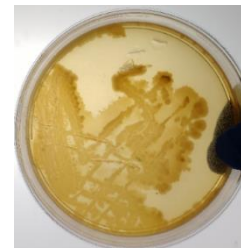
Los resultados microbiológicos obtenidos del sistema de tratamiento no permitieron validar el cumplimiento con los valores máximos permisibles establecidos en la resolución 1207 de 2014, ya que los resultados de tipo cualitativo (presencia/ausencia) no aportan la información necesaria para concluir respecto a la eficiencia actual del sistema de lagunaje a nivel microbiológico. Sin embargo, pese a los limitantes de tipo económico y de disponibilidad del laboratorio, se optó por el método de presencia/ ausencia, puesto que, permitía obtener una aproximación de los parámetros a medir y evitaba tener que suprimirlos del trabajo. Ante esto, se considera pertinente realizar los análisis empleando la técnica con el conteo de células, del Numero más probable (NMP).

Tabla 15.

Resultados del análisis microbiológico en la temporada húmeda y seca.

Fase	Medio de Cultivo	Temporada	Seca		Húmeda		
			Resultado	Entrada	Salida	Entrada	Salida
			Parámetro	Presencia (+)	Ausencia (-)	Presencia (+)	Ausencia (-)
P1	Lauryl Sulfato (Caldo)	<i>Coliformes totales</i>	(+)	(-)	(+)	(+)	
C1	Bilis Verde Brillante (Caldo)	<i>Coliformes termotolerantes</i>	(+)	(-)	(+)	(+)	
		<i>Enterococos fecales</i>	(+)	(-)	(+)	(+)	
C2	Eosina Azul de Metileno (EMB)	<i>Escherichia coli</i>	(+)	(-)	(+)	(+)	
		Salmonella / Shigella (Agar)	<i>Salmonella sp.</i>	(+)	(-)	(+)	(+)

Nota: P1= Fase presuntiva; C1= Fase confirmativa y C2= Fase complementaria. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.



(a) (b) (c)

Figura 15. Muestra fotografías de los medios de cultivo selectivos de microorganismos específicos utilizados en los análisis microbiológicos de la aguas residuales porcícolas en temporada seca y húmeda: Enterococos fecales (EMB), (b) Salmonella (Salmonella-Shigella Agar), (c) Escherichia coli (EMB). Por: Cortés & Rodríguez, 2017.

La disminución de la eficiencia en remoción de Coliformes de la temporada húmeda es asociada al aumento en la precipitación pluviométrica; la cual se relaciona con factores que pueden influir directamente en el funcionamiento de las lagunas, como: disminución en el tiempo de retención por aumento repentino del caudal, el cual genera arrastre de gran cantidad de sólidos y material inorgánico hacia las lagunas alterando en mayor o menor grado los procesos biológicos en su interior. De igual forma, la precipitación puede disminuir el contenido benéfico de las lagunas afectando el alimento disponible para la biomasa (Rolim S. , 2006); sumado a esto se genera turbulencia en el agua, la cual desencadena que gran parte de los sólidos depositados que contienen elevada carga de microorganismos patógenos en su interior se mezclen con el agua y alteren la calidad del efluente del sistema.

- **Porcentajes de remoción**

En la Tabla 16., se presentan los porcentajes de eficiencia del sistema de tratamiento en cada temporada. Se obtuvieron a partir de la realización de cuatro muestreos compuestos (dos por temporada), teniendo como base el tiempo de retención teórico del sistema de lagunaje; los resultados indican que la eficiencia es mayor en la temporada seca para los parámetros monitoreados.

Tabla 16.

Eficiencias y concentraciones reportadas del sistema de tratamiento en temporada seca y húmeda.

Variable	Temporada					
	Seca			Húmeda		
	Entrada (mg O ₂ /L)	Salida (mg O ₂ /L)	% Eficiencia	Entrada (mg O ₂ /L)	Salida (mg O ₂ /L)	% Eficiencia

DBO₅	721	19	97,36	555	17	96,94
DQO	1649	158	90,41	1230	132	89,27
SST	311	62	80,06	998	210	78,96
DBO₅	656	13	98,01	410	19	95,37
DQO	1563	134	91,55	1143	115	89,94
SST	280	44	84,28	243	49	79,84

Nota: Resultados otorgados por el laboratorio Tecno ambiental, para variables DBO₅, DQO y SST en la entrada y salida del sistema. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.

Se identificaron tres factores de incidencia en los elevados porcentajes de eficiencia del sistema de tratamiento: (i) tiempos de retención extensos de las lagunas (2 días aproximadamente), con respecto al caudal de entrada; (ii) mezcla del agua lluvia con el agua residual antes de ingresar al sistema, genera la dilución en las concentraciones de DBO₅, DQO y SST en las lagunas; (iii) uso de Microorganismos Eficientes (EM) en el sistema productivo (aspersión en corrales y adición al agua de bebida de los animales) y en ocasiones directamente en la laguna 1, facilitando los ciclos de intercambios necesarios para agilizar las fases de fermentación y descomposición de los compuestos (Yépez, y otros, 2002).

La tabla 17 muestra la relación entre las eficiencias de la temporada seca y la temporada húmeda para cada una de los parámetros DBO₅ DQO y SST.

Tabla 17.

Prueba t para muestras relacionadas.

Temporada Seca Vs. Temporada Húmeda			
Correlación de muestras	Media	Desviación estándar	Sig. (bilateral)
DBOTS - DBOTH	0,015	0,016	0,400
DQOTS - DQOTH	0,014	0,003	0,108
SSTTS - SSTTH	0,028	0,024	0,345

Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.

Las eficiencias son mayores en la temporada seca que en la temporada húmeda. En el análisis t se obtuvieron valores $p > 0,05$ (Sig. bilateral) por tanto la hipótesis no se pudo comprobar, dado que, los resultados alcanzados de los parámetros microbiológicos fueron reportados como presencia- ausencia, al ser de tipo cualitativo no se logra la información necesaria para aceptar o rechazar alguna de las dos hipótesis; por tanto es necesario realizar los análisis de laboratorio con

métodos validados (Número más Probable) para obtener datos cuantitativos, poder contrastar con la normatividad y finalmente concluir la eficiencia real que tiene el sistema de tratamiento.

A continuación, se presentan los datos obtenidos de los muestreos compuestos en la salida del sistema realizados en la temporada seca y húmeda, comparándolos con los valores límites máximos permisibles establecidos en la resolución 0631 de 2015.

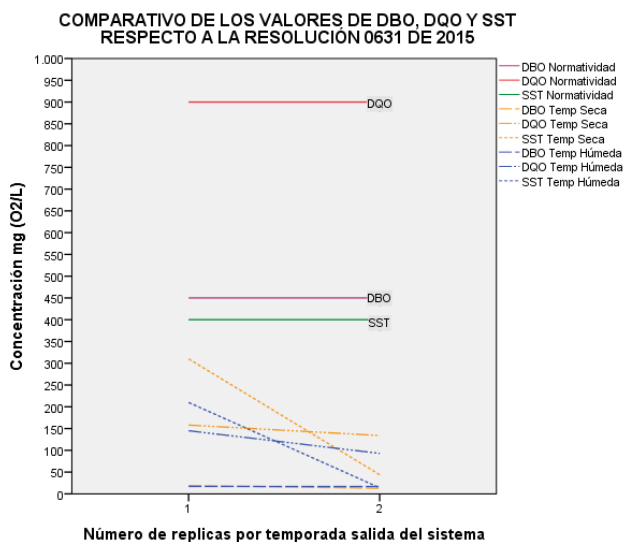


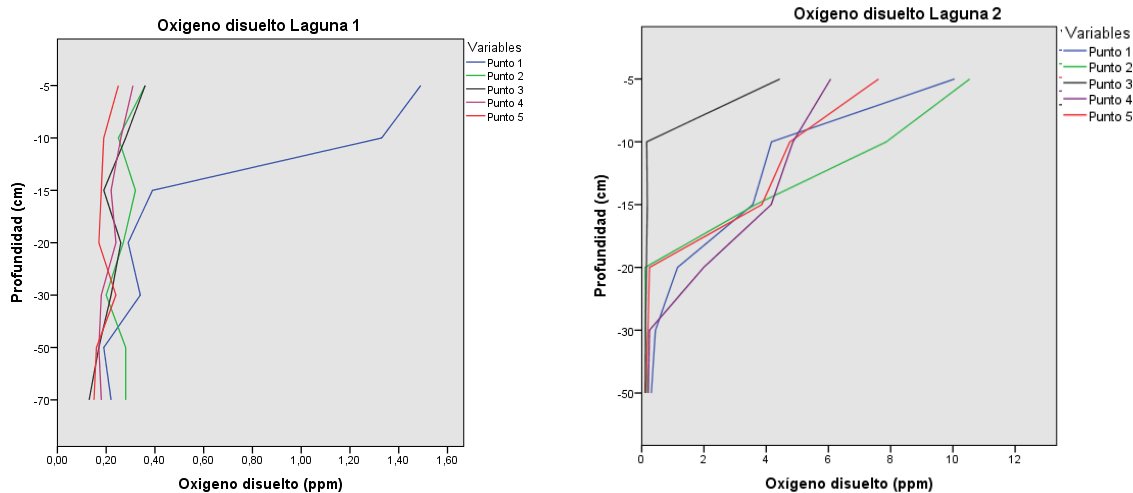
Figura 16. Presenta el comparativo de los resultados obtenidos en las mediciones de DBO₅, DQO y SST y lo establecido como valores máximos permisibles por la Resolución 0631 de 2015. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

La

Figura 16 muestra los resultados de los muestreos compuestos de DBO_5 , DQO y SST en las dos temporadas en la salida del sistema de tratamiento; se obtuvo que estos cumplen con los parámetros máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, ilustrados en la figura 16 con una línea horizontal de color rojo, (para DBO_5 es: 450 mg/l O_2 , para DQO es: 900 mg/l O_2 , y para SST es: 400 mg/l). Las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) son superiores en la temporada húmeda debido a los eventos de precipitación, los cuales generan una mezcla entre los sólidos que se encuentran en el fondo de las piscinas y la lámina de agua disponible, teniendo en cuenta la colmatación de las lagunas; por otra parte las concentraciones de DBO_5 y DQO en la salida del sistema son inferiores en la temporada húmeda, en este caso, las concentraciones son diluidas por la lluvia, la cual a su vez, provoca aumento del caudal y disminución de los tiempos de retención que maneja el sistema de tratamiento.

- **Oxígeno disuelto en las lagunas.**

La Figura 17 muestra el comportamiento del oxígeno disuelto en las tres piscinas. Teniendo en cuenta los porcentajes de eficiencia del sistema de tratamiento, surge la necesidad de conocer las características de cada laguna, para ello se realizaron cinco mediciones de oxígeno disuelto en la columna de agua disponible a diferentes profundidades (5cm, 10 cm, 15cm, 20cm, 30cm, 50cm y 70cm).



(a)

(b)

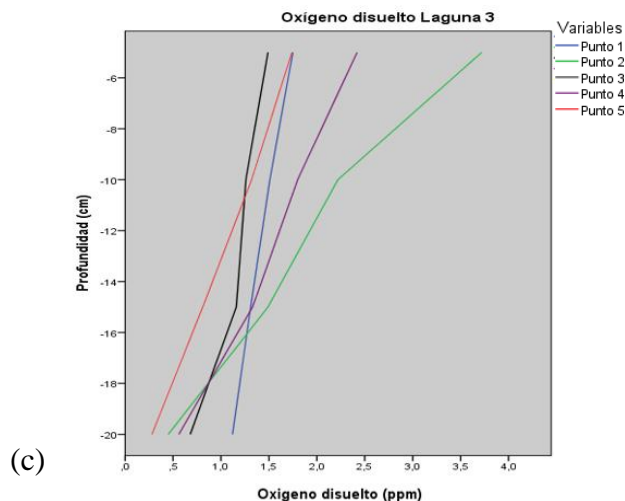


Figura 17. Muestra el comportamiento del oxígeno disuelto en las lagunas a diferentes profundidades: (a): Laguna 1; (b): Laguna 2; (c): Laguna 3. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

La cantidad de oxígeno disuelto en la laguna 1 a las diferentes profundidades es muy bajo, obteniéndose un promedio de la laguna 1 de 0,31 ppm, con un valor mínimo de 0,13 ppm a 70 cm de profundidad, y uno máximo de 1,49 ppm a 5 cm de profundidad; por las condiciones físicas observadas en campo que presenta la laguna, se puede afirmar que es anóxica.

Para el caso de la laguna 2, se obtuvo un promedio de 2,72 ppm, un valor mínimo de 0,11 ppm a 50 cm de profundidad, y uno máximo de 10,54 a 5 cm de profundidad. En la laguna 3, el promedio de oxígeno disuelto fue de 1,04 ppm, con un valor mínimo de 0,07 ppm a 30 cm de profundidad, y uno máximo de 3,72 ppm a 5 cm de profundidad.

La capa aerobia superficial de estas dos lagunas actúa como barrera contra la zona anaerobia en el fondo de estas, debido a la descomposición anaerobia de los lodos depositados en el fondo, los cuales son oxidados en la capa superficial; la profundidad de penetración del oxígeno disuelto se debe a diversos factores tales como: la temperatura, la radiación solar, la carga orgánica superficial,

el grado de mezcla y reaeración superficial (Romero, 2005). Las características de cada laguna se relacionan en la Tabla 18.

Tabla 18.

Concentración de oxígeno disuelto para lagunas aerobias, anóxicas y anaerobias

Concentración de Oxígeno Disuelto		
Tipo de laguna	Unidad	Concentración
Aerobia	mg/L	> 1,5 a 2,0
Anóxica	mg/L	< 0,2
Anaerobia	mg/L	< 0,1

Nota: Adaptado de (Massachusetts Institute of Technology - (MIT), 2006).

9.3. Datos De Precipitación En La Zona De Estudio (IDEAM)

En la Figura 18 y Figura 19 se presentan las precipitaciones medias durante los años 2001 al 2016, (excepto 2012 y 2014) de la estación 35010020 del IDEAM ubicada en Acacias- Meta, con latitud 3° 59' 40,7'' N; longitud 73° 45' 56,1'' W y una elevación 0525 m.s.n.m. Los datos correspondientes a los años 2012 y 2014 se suprimieron, ante la ausencia significativa de datos en los diferentes meses, lo cual generó incompatibilidad con el software SPSS al momento de graficar.

De acuerdo a los datos presentados se observa que los meses con menor régimen de lluvias son: diciembre, enero, febrero y marzo. La tendencia de la precipitación es aumentar con el tiempo, obteniéndose un promedio por año de 4522,60 mm de lluvia.

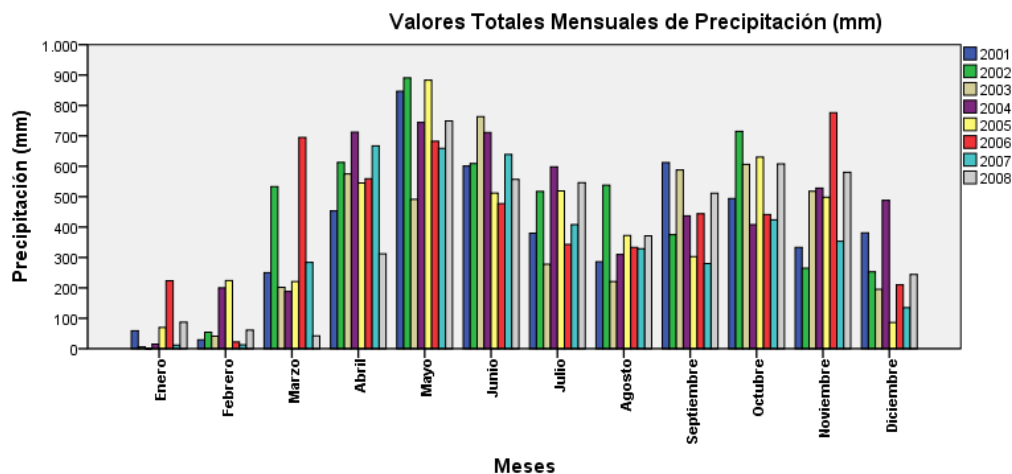


Figura 18. Valores de precipitación del municipio de Acacias-Meta (períodos 2001-2008). Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

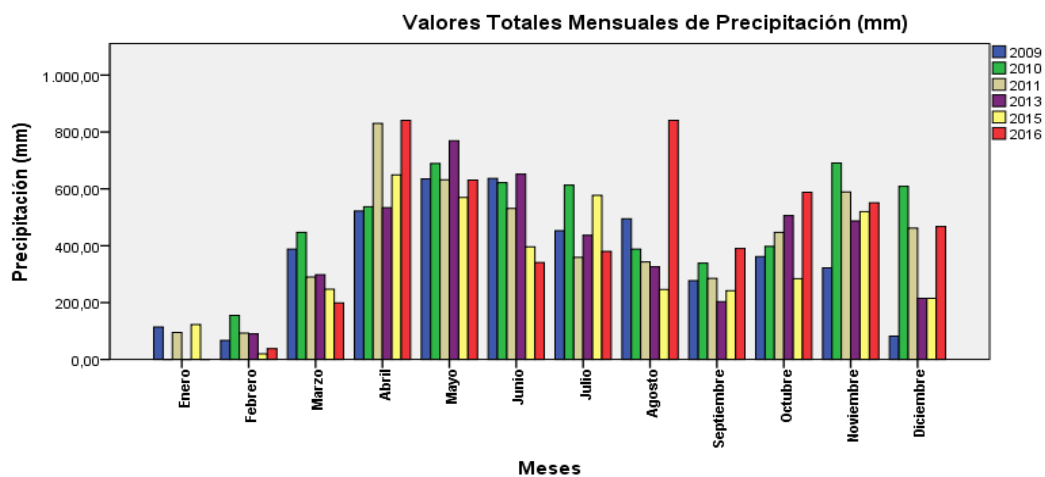


Figura 19. Valores de precipitación del municipio de Acacias-Meta (periodos 2009-2016). Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software SPSS, bajo licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

9.4. Comparativo del diseño actual del sistema de tratamiento con referentes teóricos.

La Tabla 19. presenta un comparativo entre las condiciones de diseño de los referentes teóricos estudiados y las condiciones actuales del sistema de tratamiento en cuanto a: dimensiones físicas, factores ambientales, caudal, operación y mantenimiento a partir de referentes teóricos.

Tabla 19.

Comparativo del diseño actual del sistema de lagunaje con referentes teóricos.

Descripción	Referente Bibliográfico	Condición de diseño	Condición actual	Observaciones
Laguna 1	L:A (2:1 - 4:1)	L:A (17,36 - 22,63) metros	L:A (17,36 - 22,63) metros	Relación L:A para las tres piscinas no cumplen con el referente bibliográfico, puesto que se mantiene en aproximadamente (1:1); la profundidad efectiva no cumple con las condiciones de diseño, así como los volúmenes de agua no se mantienen dadas las condiciones de colmatación de las mismas, (la laguna 1, por ser un sistema en serie, recibe la mayor carga orgánica, así mismo la carencia de un desarenado ocasiona la acumulación de lodos en las lagunas). El TRH actual en el sistema de lagunaje es inferior a los tiempos de retención de diseño y del referente bibliográfico, debido al volumen de la lámina de agua disponible, producto de la acumulación de los lodos al interior de éstas.
	P: Facultativa (1.2- 2.4 m)	P: 2 metros (Facultativa)	P: 2 metros (Facultativa) PL _A : 0,9342 metros (anóxica)	
	TRH: 5-30 días Área: varía en función del caudal a tratar	V: 517,240 m ³ TRH: 2 días Área: 22,86 m ²	V: 31,130 m ³ TRH - L _A : 2,8 horas Área: 22,86 m ²	
Laguna 2	L:A (2:1 - 4:1)	L:A (19,26 - 22,63) metros	L:A (19,26 - 22,63) metros	Relación L:A para las tres piscinas no cumplen con el referente bibliográfico, puesto que se mantiene en aproximadamente (1:1); la profundidad efectiva no cumple con las condiciones de diseño, así como los volúmenes de agua no se mantienen dadas las condiciones de colmatación de las mismas, (la laguna 1, por ser un sistema en serie, recibe la mayor carga orgánica, así mismo la carencia de un desarenado ocasiona la acumulación de lodos en las lagunas). El TRH actual en el sistema de lagunaje es inferior a los tiempos de retención de diseño y del referente bibliográfico, debido al volumen de la lámina de agua disponible, producto de la acumulación de los lodos al interior de éstas.
	P: Aerobia (0.3 - 0.45 m)	P: 1,5 metros (aerobia)	P: 1,5 metros (aerobia) PL _A : 0,6401 metros (aerobia)	
	TRH: 4-6 días Área: varía en función del caudal a tratar	V: 429,950 m ³ TRH: 1,6 días Área: 19,28 m ²	V: 141,820 m ³ TRH - L _A : 13,13 horas Área: 19,28 m ²	
Laguna 3	L:A (2:1 - 4:1)	L:A (20,26 - 22,63) metros	L:A (20,26 - 22,63) metros	Relación L:A para las tres piscinas no cumplen con el referente bibliográfico, puesto que se mantiene en aproximadamente (1:1); la profundidad efectiva no cumple con las condiciones de diseño, así como los volúmenes de agua no se mantienen dadas las condiciones de colmatación de las mismas, (la laguna 1, por ser un sistema en serie, recibe la mayor carga orgánica, así mismo la carencia de un desarenado ocasiona la acumulación de lodos en las lagunas). El TRH actual en el sistema de lagunaje es inferior a los tiempos de retención de diseño y del referente bibliográfico, debido al volumen de la lámina de agua disponible, producto de la acumulación de los lodos al interior de éstas.
	P: Aerobia (0.3 - 0.45 m)	P: 1,5 metros (aerobia)	P: 1,5 metros (aerobia) PL _A : 0,27 metros (aerobia)	
	TRH: 4-6 días Área: varía en función del caudal a tratar	V: 348.440 m ³ TRH: 1,3 días Área: 14,61 m ²	V: 172,840 m ³ TRH - L _A : 16 horas Área: 14,61 m ²	

Nota: L: A= relación largo ancho; P= profundidad; PL_A= profundidad lámina de agua; V= volumen; TRH= tiempo de retención hidráulica; TRH - L_A= tiempo de retención hidráulica de la lámina de agua.

Continúa

Tabla 19. (Continuación).

Comparativo del diseño actual del sistema de lagunaje con referentes teóricos.

Descripción	Referente Bibliográfico	Condición de diseño	Condición actual	Observaciones
Factores ambientales Laguna 1, 2 y 3	Precipitación (mm)		Precipitación (mm): 4522,6 mm	Los referentes teóricos tienen en cuenta los siguientes factores por la influencia de éstos en el sistema de lagunaje: temperatura, precipitación y radiación solar como los más importantes, la precipitación fue tomada del IDEAM, los demás parámetros ambientales no fueron medidos.
	Temperatura	No se conoce	Temperatura: 23°C - 33°C	
Caudal (Q) del sistema de tratamiento	TRH total del sistema: de 18 días	TRH: 4,9 días	TRH: 31,9 horas (1,3 días)	El TRH de diseño no se ajusta al de los referentes, al ser alterado por la colmatación de las lagunas.
	Q: Varía en función del número de animales de producción	Q diseño: 2,55 L/seg	Q máx actual: 3 L/seg Q promedio actual: 0,44 L/seg Q min actual: 0.03468 L/seg	
Operación y mantenimiento	Mantener libre de vegetación la superficie y el interior de los taludes en las lagunas; Cortar el pasto de los taludes exteriores y áreas circunvecinas a una altura de 15 cm.; Mantener limpias las unidades de entrada, interconexión y salida.	No se conoce	Poda de pasto alrededor de las lagunas	Las condiciones operativas del sistema de tratamiento son deficientes, debido a que no se realiza mantenimiento al interior de los taludes; en áreas circundantes la poda de pasto es realizada 1 vez por mes. Las unidades de entrada y salida de las lagunas, requieren cambio por falta de mantenimiento y uso. Se debe realizar un cronograma que permita garantizar las debidas funciones de operación y mantenimiento, puesto que, en la actualidad no se realizan adecuadamente.

Nota: L: A= relación largo ancho; P= profundidad; PL_A= profundidad lámina de agua; V= volumen; TRH= tiempo de retención hidráulica; TRH - L_A= tiempo de retención hidráulica de la lámina de agua. Adaptado de Romero, J. (2005). *Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

La información presentada, permitió identificar características importantes y valores de referencia generales para el dimensionamiento de lagunas de estabilización, para ello se tuvieron en cuenta las que conforman el sistema de tratamiento objeto de estudio.

9.5. Levantamiento Batimétrico

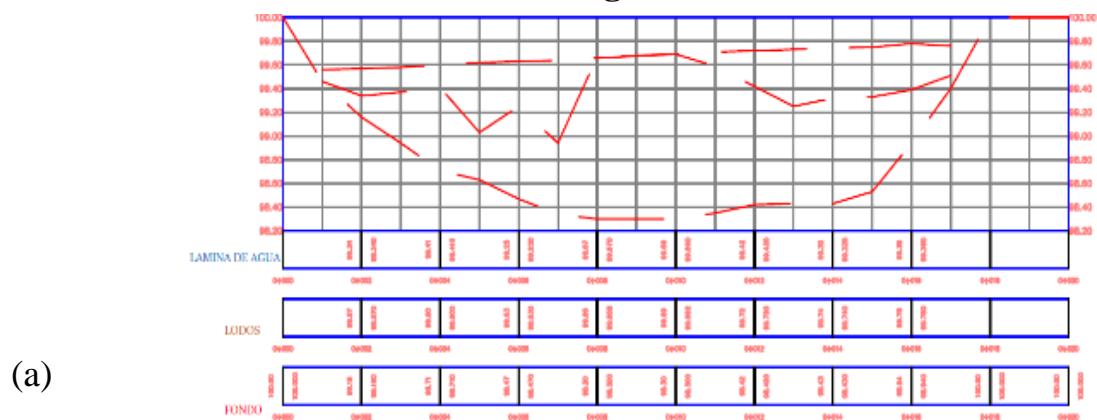
En el levantamiento batimétrico se obtuvieron mediciones en 38 puntos en la laguna 1; 52 puntos en la laguna 2 y 49 puntos en la laguna 3, realizando dos repeticiones de las mediciones en cada punto seleccionado. Dichos puntos se eligieron teniendo en cuenta las dimensiones de las lagunas y procurando abarcar la totalidad del área en cada una.

El levantamiento indicó que las profundidades medias de: la laguna 1 son de -96,2 cm; la laguna 2 de -105,3 cm, y en la laguna 3 de -126,0 cm. Sus volúmenes útiles fueron de 289,7 m³; 320,897 m³ y 325,08 m³ respectivamente.

Batimetría del sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas en la colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta.

La figura 20, vista de perfiles longitudinales transversales de las tres lagunas del sistema de tratamiento.

Laguna 1



Laguna 2

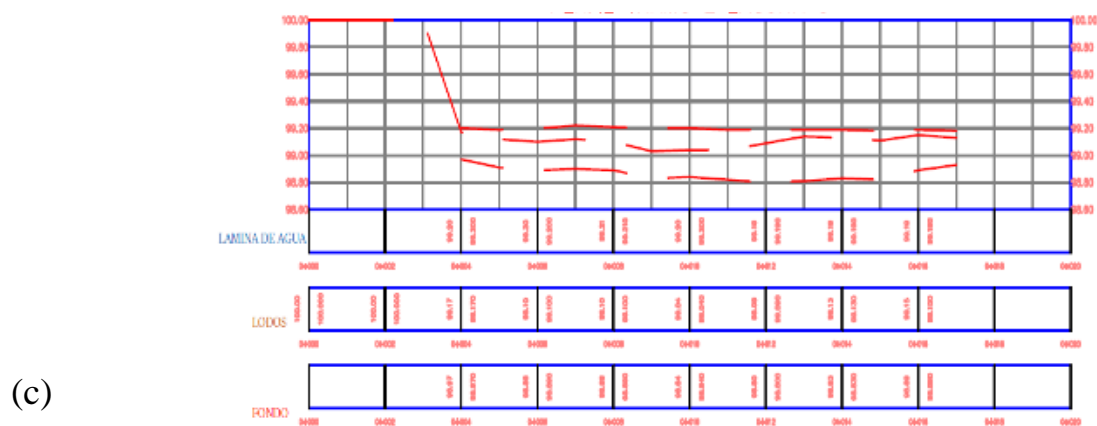
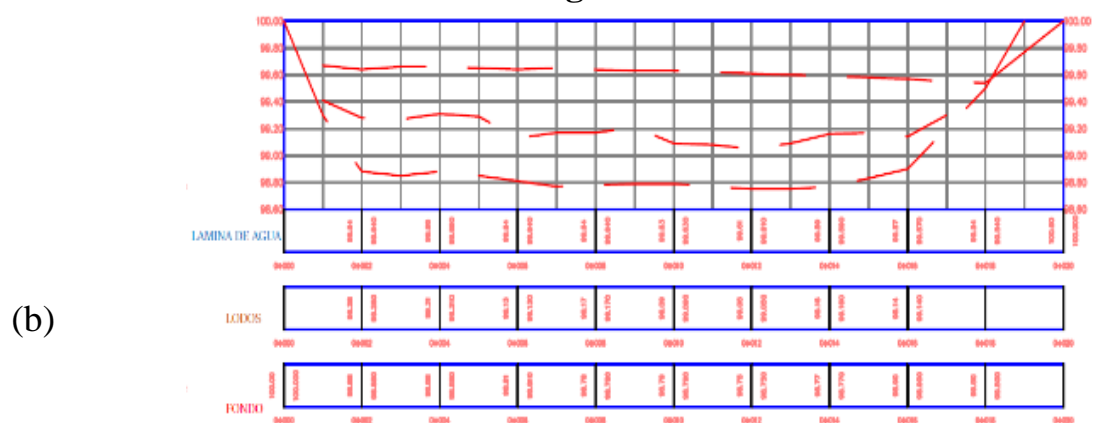


Figura 20. Perfiles longitudinales obtenidos en la realización de la batimetría: (a): Laguna 1; (b): Laguna 2; (c): Laguna 3. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017. A partir del software AutoCAD en la versión gratuita para estudiante.

En los perfiles se observa que no existe una sedimentación homogénea de lodos, existiendo zonas con acumulación crítica, y por dichos volúmenes se puede afirmar que las lagunas están colmatadas. En el anexo 5 se relacionan los tres perfiles longitudinales realizados a cada laguna.

9.6. Tiempo De Retención

Este parámetro es el más importante en la determinación de remoción de coliformes fecales en las lagunas. Para efectos de este estudio se calculó el tiempo de retención teórico (tomando en cuenta el volumen total de las lagunas) que para las lagunas 1, 2 y 3 fue: 2 días; 1,6 días y 1,3 días respectivamente. En el caso del tiempo de retención real ocupando los lodos y la lámina de agua tardando 42,83 horas en la laguna 1; 42,84 horas en la laguna 2, y 32,98 horas en la laguna 3.

9.7. Casos Exitosos

Las anteriores consideraciones cobran mayor relevancia al comparar las características del sistema de tratamiento objeto de estudio, el tipo de efluente y la calidad a obtener del mismo, con estudios piloto de sistemas de tratamiento con lagunas de estabilización en efluentes porcícolas. Tales como: La granja de traspatio ubicada en el Centro Bachillerato Tecnológico Agropecuario #8, en Morelos (México) (Escalante, CIAP - Centro de Información de Actividades Porcinas, 2000), conformada por separación física de sólidos, laguna anaerobia, facultativa y tres lagunas de maduración; la eficiencia de remoción de la DBO_5 fue del 93%; y una granja porcícola ubicada en el Estado de Campeche (México) (Escalante, 2002) en donde a partir de cálculos de diseño e implementación del software CREALE, se concluyó que la mejor opción entre 16 alternativas, el sistema conformado por un pretratamiento (separación física de sólidos), un digestor anaerobio, dos lagunas anaerobias, una laguna facultativa y tres lagunas de maduración; cuya eficiencia de remoción de la DBO_5 fue del 99,57%. Los casos anteriormente expuestos sirvieron como referente para proponer las alternativas de mejoramiento al sistema de tratamiento en cuanto a los procesos unitarios de pretratamiento diseñados específicamente en lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales porcícolas.

10. Alternativas Que Permitan Mejorar El Sistema De Tratamiento.

De acuerdo con los valores promedios de caudal (0,44 l/seg) y sólidos sedimentables (9,74 ml/l) se calculó la velocidad de sedimentación (4,2856 ml/seg) y la acumulación diaria de lodos en las piscinas (0,3703 m³/día); de esto se tiene que, han acumulado 935,677 m³ de lodos en 18 años de operación sin remoción de los mismos, a razón de 135.1595 m³/año.

A partir de lo anterior y otros aspectos identificados en el desarrollo del trabajo, se proyectan alternativas de mejora bajo un **planteamiento de tipo conceptual**. Éstas se presentan en forma jerárquica (1 – 10), en donde 1 representa la alternativa que requiere mayor prontitud en su implementación y 10, la que puede ser efectuada a mediano o largo plazo.

1. Separación de aguas residuales y aguas lluvias en el sistema de tratamiento: El aporte de las aguas lluvias al sistema de tratamiento provoca incremento del caudal de entrada, disminuye el tiempo de retención del agua en las lagunas, arrastra gran cantidad de sólidos al agua y disocia las algas de la superficie de las lagunas. Cuando se presentan eventos de precipitaciones fuertes, se genera turbulencia en las piscinas, dando lugar a la mezcla de la parte inferior (lodos) y superior de la lámina de agua, así mismo las lluvias intensas diluyen el contenido de las lagunas y la biomasa disponible, generando alteración de los procesos durante el tratamiento. Debido a lo anterior se propone realizar la segregación de aguas lluvias del sistema de recolección de aguas residuales por piscinas, por medio de la desviación de las bajantes de aguas lluvias de los techos en las áreas operativas hacia los bajos topográficos, lagunas piscícolas, canales de aguas lluvias etc, de manera que se elimine el ingreso de este caudal a las lagunas.

2. Compra de hidrolavadoras: las hidrolavadoras son herramientas necesarias porque disminuyen el consumo de agua para el lavado de corrales y por consiguiente minimiza el volumen de agua residual de esta fase; la función de presión y cierre, permite pasar de consumir 3 litros/seg en los picos máximos de lavado a 12 litros/min (0.2 L/s), cantidad considerable para optar por esta alternativa.

3. Extracción de lodos de las tres lagunas: la extracción debe ser realizada en temporada seca (diciembre, enero y febrero), para facilitar su remoción y la disminución de humedad. Así

mismo, se debe habilitar una zona para la estabilización de los lodos, con el fin de reducir la presencia de microorganismos patógenos, eliminar olores desagradables e inhibir su putrefacción. Para esto es necesario agregar cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca (OH)₂), material alcalino utilizado para lograr mantener el pH por encima de 11,5 unidades durante mínimo 22 horas. Posterior a su tratamiento, los lodos pueden ser dispuestos de forma segura en el suelo o reutilizados como abono (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (MAGyP); Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 2012).

4. Impermeabilización de las lagunas de estabilización: La impermeabilización de las lagunas se recomienda realizarla con dos tipos de material: (i) arcilla h=0,15 cm, o (ii) geo membrana en cada una de las piscinas (1300 m² aproximadamente), para evitar la infiltración del agua residual en el suelo y en los acuíferos, previniendo de esta forma la contaminación del subsuelo (Romero, 2005).

5. Extracción del biodigestor: el biodigestor que se encuentra fuera de servicio en la entrada del agua al sistema, requiere ser retirado para aprovechar el área que ocupa en la instalación del pretratamiento que se propone (cribado y desarenador), teniendo en cuenta que dicho elemento se encuentra en mal estado sin realizar su función de diseño; inicialmente se consideró habilitar nuevamente el artefacto, sin embargo por parte de la entidad se expresó claramente la negativa ante esta iniciativa, puesto que, no se cuenta con los recursos económicos necesarios para dicho propósito. De igual manera se manifestó la falta de compromiso por parte de los funcionarios e internos a cargo en el manejo indicado del biodigestor; sumado a la dificultad que representa el corto período de tiempo que permanecen los internos en determinadas labores antes de recobrar la libertad; lo cual obstaculiza la continuidad en los procesos de capacitación que se lleven a cabo.

6. Construcción e instalación de rejillas (cribado) de limpieza manual: El ingreso de sólidos gruesos al sistema de tratamiento tales como: guantes, bolsas, jeringas, entre otros, hacen necesario adicionar un cribado, el cual permite separar el material grueso del agua mediante el paso de esta por una rejilla gruesa, dicha rejilla debe construirse en forma rectangular con la siguientes características: 32,74 cm de ancho, 42,04 cm de alto, que contenga 9 barras circulares de 0,95 cm de diámetro, es decir de 3/8 de hierro o acero, a una distancia de 2,5 cm entre cada

barra; así mismo debe contener un canal abierto que permita la limpieza manual de las rejillas (longitud del canal: 80 cm, ancho del canal: 32,04 profundidad: 42,49 cm) las cuales deben tener una inclinación de 45° con respecto a la horizontal. El anexo 4 ilustra la vista en planta del proceso unitario de cribado. La limpieza de sólidos gruesos en las rejillas y las actividades descritas en la tabla 6. Lo anterior se diseñó a partir de las ecuaciones de (Romero, 2005) relacionado en el anexo 3.

7. Construcción e instalación de un desarenador: al sistema de tratamiento en le ingresan 253,22 (ml/l) de sólidos sedimentables en 2 días, lo que ha ocasionado la colmatación de las lagunas de estabilización durante los 18 años de funcionamiento; por tanto, es necesario construir un tanque desarenador de flujo horizontal en concreto que cuente con las siguientes dimensiones: **Largo:** 2 metros, **Ancho:** 1 metro y **Profundidad:** 3 metros, **Pendiente:** 7%; volumen suficiente para almacenar el caudal máximo horario (3000 ml/l) y la cantidad de sólidos acumulables en dos días, con un tiempo de retención de 3 minutos, requerimientos mínimos para realizar el debido mantenimiento al desarenador. Se recomienda realizar cada 2 días la extracción de los sólidos sedimentables acumulados en el desarenador. El anexo 4 ilustra la vista en planta del proceso unitario de desarenado. Lo anterior, se diseñó a partir de las ecuaciones de (Romero, 2005) relacionado en el anexo 1.

8. Implementación de By pass: Es importante implementar conexiones bypass en el sistema de lagunaje, el cual permite el paso o desviación controlada del caudal de entrada de las piscinas mediante tuberías y cajas, facilitando el proceso de mantenimiento de las lagunas, ya que permite vaciar las piscinas para realizar mantenimiento, extracción de lodos, impermeabilización, entre otras labores necesarias que requiere el sistema de tratamiento. La distribución de las cajas y la tubería diseñada para el by pass se ilustra en el anexo 4.

9. Adecuación de tuberías de ingreso y salida de cada laguna. Las salidas de las lagunas requieren una adecuación de tubería con nivel, de tal forma que impida que las lagunas se desocupen y que a su vez, se maneje el tiempo de retención aportado por cada una, dado que las salidas existentes no son adecuadas, puesto que, (i) la salida de la piscina 1 es un canal de 80 cm de ancho y 30 cm de profundo, aportando un caudal elevado a la laguna 2, y (ii) la salida de la

laguna 2 tiene la tubería a una altura de 30 cm respecto al fondo de la misma, por lo anterior es necesario realizar estas adecuaciones.

10. Baffle deflector: El uso de deflectores o mamparas en los sistemas de lagunaje mejoran las condiciones hidráulicas reduciendo las áreas muertas de las piscinas, estudios previos afirman que se obtiene mayor eficiencia hidráulica con mamparas a 70% de la longitud de las lagunas. Se diseñaron conceptualmente en la laguna 1, un baffle de deflector, en la laguna 2 y 3 dos baffles por cada piscina, con el fin de reducir las áreas muertas de las lagunas evidenciadas en el trabajo en campo. (Cortés, Treviño, Alcorta, Sáenz, & Luis, 2013). El anexo 4 muestra las dimensiones y la ubicación específica de los baffles deflectores.

10.1. Costos De Alternativas De Mejoramiento.

Los costos de mejoramiento de las alternativas de solución se relacionan en la Tabla 20.:

Tabla 20.

Costo de capital	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor total
1. Construcción e instalación de cribado (Rejillas) de limpieza manual				
Estructura rejilla	U.	1	-	\$ 13.500
Estructura en concreto, canal de la rejilla	m ³	0,28	\$ 302.900	\$ 84.812
2. Construcción de tanque desarenador				
Desarenador, estructura en concreto hidráulico	m ³	0,86	\$ 302.900	\$ 260.494
3. Baffle deflector				
Estructura en concreto, construcción muros	m ³	23,97	\$ 302.900	\$ 7.260.513
4. Impermeabilización de las lagunas de estabilización				
Impermeabilización con arcilla h=0,15cm	m ³	3,6	\$ 1.000	\$ 3.600
Impermeabilización con geomembrana calibre 40	m ²	1300	\$ 7.900	\$ 10.270.000

Tabla 20. (Continuación).

Costo de capital	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor total
5. Implementación de By pass				
Estructura en concreto hidráulico canales	m ³	2,7	\$ 302.900	\$ 817.830
Estructura en concreto hidráulico cámaras	m ³	0,86	\$ 302.900	\$ 260.494
Tubería 8" con tapón	U.	4	\$ 17.300	\$ 69.200
7. Compra de hidrolavadoras				
Hidrolavadoras de uso industrial	U.	2	\$ 256.000	\$ 512.000
8. Extracción del biodigestor				
Obreros	días	3	-	-
9. Adecuación de tuberías de ingreso y salida de cada laguna				
Tubería de conexión Tubos PVC 4	m	2	\$ 6.200	\$ 12.400
Lonas	N° lonas	15	\$ 500	\$ 7.500
Tubo de 2" x3 metros (6 metros)	m	6	\$ 14.267	\$ 85.602
Tubería de descarga	m	2	-	\$ 35.000
Codos	U.	6	\$ 7.500	\$ 45.000

Costos de alternativas de mejoramiento.

Nota: En los costos no se tiene en cuenta la separación de las aguas residuales con las aguas lluvias, por otra parte no se calculó el valor de la extracción del biodigestor ni la extracción de los lodos dado que son labores que se pueden realizar de forma manual utilizando el personal interno. Elaborado por: Cortés & Rodríguez, 2017.

11. Discusión de Resultados y Recomendaciones

El sistema de tratamiento por lagunas presente en la Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacias Meta, responde en su comportamiento con características similares de sistemas referenciados, en cuanto a que en general la temperatura se relaciona directamente con los eventos de precipitación y se presentan variaciones de pH.

Se encontraron valores de conductividad que sobrepasan los valores típicos, pero no la normativa y se pudo establecer que estas variaciones están asociadas a los altos flujos de agua lluvia y la dilución que efectúan del agua residual.

Para los muestreos *in situ* y *ex situ* es importante aumentar su cantidad y frecuencia, e implementar monitoreos nocturnos a fin de obtener mayor número y precisión de los datos, así como una caracterización más completa del agua residual, teniendo en cuenta que para algunos parámetros se presentan variaciones significativas en horas de la noche. Para efectos de este trabajo, no se obtuvo la autorización de ingreso en horas de la noche para la realización de los muestreos, por tratarse de un centro de reclusión. Con el ánimo de no comprometer la seguridad de la entidad, es necesario capacitar al personal de guardia en dichas labores para su respectiva ejecución.

Esto permite identificar posibles cambios que se puedan presentar en determinada temporada o bajo la influencia de diversos factores ambientales tales como: radiación solar, temperatura ambiente, evaporación, entre otros; los cuales para el caso particular a este trabajo no se incluyeron, puesto que la estación más cercana de monitoreo ambiental del IDEAM a la zona de estudio solo registra datos de precipitación, sumado a esto no se tiene acceso a la totalidad de los datos oficiales en corto tiempo, lo cual genera inconvenientes en el cumplimiento de la metodología propuesta en el tiempo establecido.

Así mismo, se requiere incluir la medición de parámetros tales como: Nitrógeno (N) y Fósforo (P), para establecer una caracterización más detallada del efluente a tratar; teniendo en cuenta los impactos ambientales negativos en suelo y agua (superficial y subterránea) derivados de la presencia de estos compuestos en volúmenes elevados.

Inicialmente en el diseño metodológico no se contempló el monitoreo de los sólidos sedimentables, puesto que la mayoría de los referentes teóricos no asocia este tipo de sólidos con efluentes de la porcicultura; sin embargo se observó que durante las horas de lavado donde se presenta los máximos caudales la cantidad de estos es elevada, por lo que se requiere su monitoreo y control.

Por otra parte, los parámetros microbiológicos implementando el método de Número Más Probable (NMP), permite obtener una estimación de densidades poblacionales y a partir de esto realizar un comparativo con la resolución 1207 de 2014 para establecer si se puede hacer reúso del efluente del sistema lagunar en la producción piscícola que se desarrolla en el establecimiento.

Conocer el TRH real de las lagunas es fundamental, para lo cual se puede hacer uso de trazadores; en el caso particular a este trabajo, ante la dificultad de adquirir el colorante indicado, se intentó realizar implementado una solución de Cloruro de Sodio (NaCl), sin embargo, el resultado esperado no se alcanzó al no evidenciar claramente el recorrido de la solución en cada laguna y el aumento que se esperaba en los valores de la conductividad en la salida de las mismas, producto de la solución salina agregada.

Para futuros trabajos se recomienda realizar un estudio detallado que establezca los flujos de energía y recursos de las entradas y salidas en cada fase del proceso productivo, a fin de estandarizar cada actividad a desarrollar y lograr la articulación del sistema de tratamiento con el área productiva. Así mismo, teniendo en cuenta la cantidad de sólidos que ingresan al sistema, es importante realizar un análisis y seguimiento de la composición de los lodos en cada laguna para establecer su grado y tipo de influencia en la eficiencia del sistema de tratamiento.

En relación con lo anterior, la articulación del sistema productivo con el sistema de tratamiento es necesaria por lo que se recomienda realizar capacitaciones y establecer los protocolos necesarios que permitan el buen funcionamiento del sistema de tratamiento desde la parte productiva, como generadora del efluente.

Conclusiones

De acuerdo al alcance de la evaluación de la eficiencia del proceso de tratamiento de las aguas residuales porcícolas en la colonia agrícola de mínima seguridad de Acacías, se puede concluir:

Objetivo 1.

- Los resultados de los monitores *In Situ* y *Ex Situ* arrojaron que el sistema ha logrado adaptarse a las condiciones e incluso superar las expectativas en la capacidad de tratamiento, puesto que los valores medios de los parámetros monitoreados cumplen con la normatividad ambiental vigente.

-

- De acuerdo a los parámetros *In Situ*, el sistema de lagunaje presenta un rango de temperaturas entre los 23°C y 33°C; en cuanto al pH, O.D. y conductividad las variaciones fueron de 6.2 y 8.89 unidades; 2.76 y 23.43 ppm y 989 y 1567 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente; en la salida de las etapas del sistema de tratamiento, se obtuvieron condiciones semejantes a las reportadas por los referentes teóricos (Romero, 2005) para lagunas de oxidación de similares características.

-

- El caudal que ingresa al sistema de tratamiento registró un valor máximo de 3 L/seg y un valor medio de 0.436 L/seg; producto del agua del lavado, las deyecciones de los animales y el agua lluvia en momentos de precipitación; este factor debe ser controlado para evitar alzas súbitas de caudal que disminuyen los tiempos de retención hidráulica y generan dilución de las asociaciones microbianas encargadas del proceso de degradación.

-

- El caudal del agua residual a tratar está condicionado a los horarios de lavado, en donde se reportaron los caudales máximos horarios del orden de 3 L/m, con sólidos sedimentables que alcanzaron valores de 134 ml/l, este factor sumado al tiempo de operación sin remoción de los mismos se relaciona directamente con la colmatación de las lagunas.

-

- De acuerdo a los parámetros *Ex situ* la temporada seca tuvo la mayor eficiencia promedio de remoción de DBO₅ 97.68%, DQO 90.98% y SST 82.17% respecto a la temporada húmeda,

donde los porcentajes registrados fueron de 96.94%, 89.60% y 79.4% respectivamente; los resultados se asociaron a tres factores de incidencia como: (i) tiempos de retención extensos de las lagunas, con respecto al caudal de entrada; (ii) dilución de las concentraciones de DBO₅, DQO y SST en el afluente del sistema por acción del agua lluvia; (iii) uso de Microorganismos Eficientes (EM) en el sistema productivo y directamente en la laguna No.1.

- Se registró presencia de los Coliformes evaluados a la entrada del sistema de tratamiento en las dos temporadas, en cuanto a la salida del sistema se reportó ausencia de los microorganismos solo en la temporada seca. Lo anterior se atribuye a la acción ejercida por la precipitación pluviométrica, la cual genera un efecto de mezcla de los lodos con la lámina de agua disponible en las lagunas.

Objetivo 2.

- Las lagunas presentan una relación longitud: ancho de 1:1, sin embargo, las condiciones ideales de tamaño según referentes teóricos es 2:1 (Romero, 2005), esto con el objetivo de fomentar un flujo tipo pistón.

- El levantamiento batimétrico indicó que el promedio de las profundidades totales para: la laguna 1 fue de 126,0 cm; la laguna 2 de 105,3 cm, y en la laguna 3 de 96,2 cm; así mismo los volúmenes útiles de lodos en las lagunas fueron de 289,7 m³; 320,897 m³ y 325,08 m³ respectivamente, observándose en los perfiles que no existe una sedimentación homogénea. Por lo anterior y teniendo en cuenta la lámina de agua disponible, se afirma que las lagunas están colmatadas.

- Las profundidades de las lagunas permitieron establecer que la laguna 1 recibe la mayor carga orgánica; esta fue diseñada como una laguna facultativa con una profundidad total de 2 metros, en la actualidad dicha profundidad se mantiene, sin embargo, se comporta como una laguna anóxica debido a la lámina de agua disponible (0,086 metros); las lagunas 2 y 3 continúan siendo aerobias (1.5 metros de diseño), sin embargo, la lámina de agua disponible es de 0,385 m y 0,26 m respectivamente, dada la colmatación de las lagunas.

- La salida de la laguna 1 es un canal abierto que no cumple con las condiciones recomendadas por los referentes teóricos, las cuales para conexiones de entrada y salida de cada

piscina deben tener tuberías de PVC, así mismo, no existe una conexión bypass que permita realizar la desviación del caudal cuando sea necesario realizar un mantenimiento al sistema de tratamiento.

- El adecuado funcionamiento de un sistema de tratamiento debe ir en función de las buenas prácticas efectuadas por el generador del efluente.

Objetivo 3.

- El mantenimiento que se realiza en la entidad al sistema de tratamiento involucra la poda de pasto cada mes en áreas circundantes a las lagunas, sin embargo, los referentes teóricos recomiendan adicionalmente mantener libre de vegetación y pasto la superficie, el interior y exterior de los taludes en las lagunas; cortar el pasto de áreas circunvecinas a una altura de 15 cm. Así como mantener limpias las unidades de entrada, interconexión y salida. Actividades necesarias para el adecuado funcionamiento del sistema.

- El alto contenido de sólidos sedimentables en las aguas residuales porcícolas requiere la implementación de un pre tratamiento (cribado y desarenador), a fin de disminuir la cantidad de sólidos que ingresan al sistema y la frecuencia de mantenimiento de las piscinas por acumulación de lodos.

- Reducir el consumo de agua potable para el lavado de los corrales a través del uso de hidrolavadoras, permite disminuir el consumo de agua en un 60%, respecto al lavado actual que se realiza con manguera.

- Segregar las aguas lluvias que se incorporan al sistema de tratamiento, a través del desvío de las bajantes de aguas lluvias de los techos hacia un sistema exclusivo para aguas lluvias y otras adecuaciones menores, permitiría la eliminación de caudales pico del orden de 3 L/seg en un evento de lluvia y evitaría la disgregación de los microorganismos presentes en el agua residual.

- La instalación de un sistema de By pass entre las piscinas, permitiría aislar las piscinas para eventuales mantenimientos y la extracción de lodos, labores requeridas para optimizar la eficiencia del sistema de tratamiento.

Anexos

Anexo 1. Cálculo eficiencia del sistema de tratamiento

- **La eficiencia de las lagunas en la temporada seca, para muestra compuesta fue:**

$$\text{Eficiencia de Remoción DBO}_5 (\%) = \frac{[721 \text{ mg O}_2/\text{L} - 19 \text{ mg O}_2/\text{L}] * 100}{[721 \text{ mg O}_2/\text{L}]} = 97,36 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción DQO} (\%) = \frac{[1649 \text{ mg O}_2/\text{L} - 158 \text{ mg O}_2/\text{L}] * 100}{[1649 \text{ mg O}_2/\text{L}]} = 90,41 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción SST} (\%) = \frac{[311 \text{ mg O}_2/\text{L} - 62 \text{ mg O}_2/\text{L}] * 100}{[311 \text{ mg O}_2/\text{L}]} = 80,06 \%$$

- **La eficiencia de las lagunas en la temporada seca, para muestra compuesta fue:**

$$\text{Eficiencia de Remoción DBO}_5 (\%) = \frac{[656 \text{ mg O}_2/\text{L} - 13 \text{ mg O}_2/\text{L}] * 100}{[656 \text{ mg O}_2/\text{L}]} = 98,01 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción DQO} (\%) = \frac{[1563 \text{ mg O}_2/\text{L} - 134 \text{ mg O}_2/\text{L}] * 100}{[1563 \text{ mg O}_2/\text{L}]} = 91,55 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción SST} (\%) = \frac{[280 \text{ mg O}_2/\text{L} - 44 \text{ mg O}_2/\text{L}] * 100}{[280 \text{ mg O}_2/\text{L}]} = 84,28 \%$$

- **La eficiencia del STAR porcícolas en la temporada húmeda, para muestra compuesta fue:**

$$\text{Eficiencia de Remoción DBO}_5 (\%) = \frac{[555 \text{ mg O}_2/\text{L} - 17 \text{ mg O}_2/\text{L}]}{[555 \text{ mg O}_2/\text{L}]} * 100 = 96,94 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción DQO} (\%) = \frac{[1230 \text{ mg O}_2/\text{L} - 132 \text{ mg O}_2/\text{L}]}{[1230 \text{ mg O}_2/\text{L}]} * 100 = 89,27 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción SST} (\%) = \frac{[998 \text{ mg O}_2/\text{L} - 210 \text{ mg O}_2/\text{L}]}{[998 \text{ mg O}_2/\text{L}]} * 100 = 78,96 \%$$

- **La eficiencia del STAR porcícolas en la temporada húmeda, para muestra compuesta fue:**

$$\text{Eficiencia de Remoción DBO}_5 (\%) = \frac{[410 \text{ mg O}_2/\text{L} - 19 \text{ mg O}_2/\text{L}]}{[410 \text{ mg O}_2/\text{L}]} * 100 = 95,37 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción DQO} (\%) = \frac{[1143 \text{ mg O}_2/\text{L} - 115 \text{ mg O}_2/\text{L}]}{[1143 \text{ mg O}_2/\text{L}]} * 100 = 89,94 \%$$

$$\text{Eficiencia de Remoción SST} (\%) = \frac{[243 \text{ mg O}_2/\text{L} - 49 \text{ mg O}_2/\text{L}]}{[243 \text{ mg O}_2/\text{L}]} * 100 = 79,84 \%$$

Anexo 2. Tiempos de retención hidráulico.

- Para el cálculo del Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), se halló el área de cada laguna y posteriormente se calculó el volumen de las mismas. La tabla 19 muestra los resultados obtenidos.

$$\text{Área Laguna 1} = \frac{(\text{Base mayor} + \text{base menor})(h)}{2}$$

$$\text{Volumen} = \text{superficie} * \text{longitud}$$

$$\text{TRH} = \frac{\text{Volumen de laguna (L)}}{Q \text{ medio (L/día)}}$$

Tabla 21.

Datos para el cálculo del TRH.

	Base mayor (m)	Base menor (m)	Profundidad efectiva (h)	Profundidad lámina de agua (h) (m)	Profundidad lodos (h)	Longitud
Laguna 1	20,28	16,00	96,2 cm	0,421	0,701	22,63
Laguna 2	19,29	17,33	105,3 cm	0,347	0,786	22,30
Laguna 3	17,36	13,00	126 cm	0,086	0,898	23,85

Fuente: Autoras

Para efectos del cálculo del TRH, la altura de la lámina de agua y el nivel de lodos se determinó con las alturas y niveles medios de cada piscina, valores obtenidos del levantamiento batimétrico (para el caso de los lodos: método de la toalla blanca).

- **Tiempo de Retención Hidráulica Teórico**

$$\text{Laguna 1} = \frac{517.240 \text{ L}}{259.200 \text{ L/día}} = 1,995 \text{ días}$$

$$\text{Laguna 2} = \frac{429.950 \text{ L}}{259.200 \text{ L/día}} = 1,659 \text{ días}$$

$$\text{Laguna 3} = \frac{348.440 \text{ L}}{259.200 \text{ L/día}} = 1,34 \text{ días}$$

- **Tiempo de Retención Hidráulica Lámina de Agua**

$$\text{Laguna 1} = \frac{31.130 \text{ L}}{10.800 \text{ L/hora}} = 2,88 \text{ horas}$$

$$\text{Laguna 2} = \frac{141.820 \text{ L}}{10.800 \text{ L/hora}} = 13,13 \text{ horas}$$

$$\text{Laguna 3} = \frac{172.840 \text{ L}}{10.800 \text{ L/hora}} = 16,00 \text{ horas}$$

Anexo 3. Cálculos de diseño

1. Cribado (Rejillas) de limpieza manual.

H = Pérdida de energía (m)

β = Factor de forma de las barras circulares ($\beta=1,79$)

w = ancho máximo de la sección transversal de las barras, en la dirección de flujo (m) = 0,95 3/8

b = espaciamiento o separación mínima entre las barras (m) = 2,5 cm

Θ = ángulo de la rejilla con la horizontal

- **Pérdida de energía en las rejillas**

$$H = \beta * \frac{w^4}{b} * h_v * \text{sen } \Theta$$

$$H = 1,79 * \frac{0,95 \text{ cm}^4}{2,5 \text{ cm}} * \frac{(0,375 \text{ m/seg})^2}{2(9,81 \text{ m/seg})} * \text{sen } 45^\circ = 2,5 \times 10^{-3}$$

- **Área del canal o rejilla**

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = \frac{0,003042 \text{ (m}^3/\text{seg)}}{0,375 \text{ (m/seg)}} = 8,112 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

- **Ancho del canal de 0,3 m, la altura de la lámina de agua sería:**

$$h = \frac{A}{\text{ancho de canal}}$$

$$h = \frac{8,112 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{0,3 \text{ m}} = 0,02704 \text{ m}$$

- **Longitud de la rejilla**

$$L = \frac{h}{\text{sen } \Theta}$$

$$L = \frac{0,02704 \text{ m}}{\text{sen } (45^\circ)} = 0,03824 \text{ m}$$

- **Número de barras requeridas**

$$n = \frac{a + b}{w + b}$$

$$n = \frac{0,30 \text{ m} + 0,025 \text{ m}}{0,0095 \text{ m} + 0,025 \text{ m}} = 15,94 \text{ m} \cong 16 \text{ barras}$$

2. Desarenador de flujo horizontal

Caudal (m³/seg) = 0,003042

Sólidos suspendidos (mg/l) = 998

Sólidos sedimentables (ml/l) = 300

Viscosidad cinemática (m²/seg) = 0,803x10⁻⁶

Temperatura (°C) = 30

Densidad relativa de las partículas (g/cm^3) = 1,33

Densidad relativa del agua (g/cm^3) = 1

Gravedad (g/cm^3) = 9,81

Diámetro de la partícula (cm) = 0,01

Tiempo de retención hidráulica (TRH) = 180 seg

- **Velocidad de sedimentación (VS)**

$$VS = \frac{1}{18} * g * \left(\frac{\rho_s - \rho}{\mu} \right) * d^2$$

$$VS = \frac{1}{18} * 9,81 \frac{g}{cm^3} * \left(\frac{1,33 - 1}{0,803 \times 10^{-3} \left(\frac{m^2}{seg} \right)} \right) * (0,01 cm)^2 = 21,7 \text{ cm/seg}$$

- **Tiempo de caída de la partícula (t)**

$$t = \frac{H}{vs}$$

$$t = \frac{65 \text{ cm}}{21,67 \text{ (cm/seg)}} = 2,99 \text{ seg}$$

- **Volumen útil del desarenador (V)**

$$V = Q * tr$$

$$V = 0,003042 (\text{m}^3/\text{seg}) * 180 \text{ seg} = 0,54756 \text{ m}^3$$

- **Área superficial (As)**

$$As = \frac{V}{H}$$

$$As = \frac{0,54756 \text{ m}^3}{0,65 \text{ cm}} = 0,8424 \text{ m}$$

- **Cálculo de la base (b)**

$$b = \sqrt{\frac{AS}{4}}$$

$$b = \sqrt{\frac{0,8424 \text{ m}}{4}} = 0,46 \text{ m}$$

- **Largo (l)**

$$l = 4 * b$$

$$l = 4 * 0,46 \text{ m} = 1,84 \text{ m}$$

Las dimensiones del desarenador recomendadas obedecen al almacenamiento máximo de lodos en 2 días

3. Diseño By Pass

Condiciones de diseño de alcantarillado

- No. de Freud: no debe estar entre 0,9 a 1,1
- Velocidad mínima= 0,45 m/s
- Velocidad máxima= 5 m/s
- Fuerza tractiva= $1,5 \frac{N}{m^2}$

$$\tau = \gamma \cdot h_m \cdot S$$

• Caudal- Agua lluvia en las piscinas

$$1) Q_{(piscina 1)} = 2,78 * C * I * A$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2mm}{hora}\right) * (458,9364m^2)$$

$$1mm \text{ de } H_2O = \frac{1L H_2O}{m^2}$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2mm}{hora} * \frac{1L/m^2}{1 \frac{mm}{L}}\right) * (458,9364m^2)$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2L}{hora * m^2}\right) * (458,9364m^2)$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2L}{h * m^2} * \frac{1hr}{60 min} * \frac{1min}{60 seg}\right) * (458,9364m^2)$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2L}{3600seg * m^2}\right) * (458,9364m^2)$$

$$Q = \left(\frac{1531,01183}{3600} \frac{L}{seg}\right) \rightarrow 0,425281064 \frac{L}{seg} * \frac{1m^3}{1000L}$$

$$Q = 0,00042581 \frac{m^3}{seg} \rightarrow \text{Caudal piscina 1}$$

$$2) Q_{(piscina 2)} = 2,78 * C * I * A$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2mm}{hora}\right) * (458,9364m^2)$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2L}{3600 seg * m^2}\right) * (436,5327 m^2)$$

$$Q = \left(\frac{1456,273087}{3600} \frac{L}{seg}\right) \rightarrow 0,404520302 \frac{L}{seg} * \frac{1m^3}{1000L}$$

$$Q = 0,00040452 \frac{m^3}{seg} \rightarrow \text{Caudal piscina 2}$$

$$3) Q_{(piscina 3)} = 2,78 * C * I * A$$

$$Q = (2,78) * (0,60) * \left(\frac{2L}{3600 \text{ seg} * m^2} \right) * (392,8568 m^2)$$

$$Q = \left(\frac{1310,570285}{3600} \frac{L}{\text{seg}} \right) \rightarrow 0,3640473018 \frac{L}{\text{seg}} * \frac{1m^3}{1000L}$$

$$Q = 0,000364047 \frac{m^3}{\text{seg}} \rightarrow \text{Caudal piscina 3}$$

- **Caudal total en las piscinas**

$$Q_{(Total)} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{(Total)} = 0,00042581 \frac{m^3}{\text{seg}} + 0,00040452 \frac{m^3}{\text{seg}} + 0,000364047 \frac{m^3}{\text{seg}}$$

$$Q_{(Total)} = 0,001194377 \frac{m^3}{\text{seg}}$$

- **Diseño de Colectores (tubería) para el caudal del proceso productivo**

$$Q = \frac{A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

$$\Delta Q = \frac{0,312 * D^{\frac{8}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n} \rightarrow \text{Caudal a tubo lleno}$$

$$Q_{(Real \text{ Proceso} \\ \text{Productivo})} = 0,003042 \frac{m^3}{\text{seg}}$$

- $n = 0,009 \rightarrow$ Coeficiente de Manning
- $S = 1\% \rightarrow 0,01$
- $\varnothing = 8'' \rightarrow 0,2032 m$

$$Q_{(Tubo \\ Lleno)} = \frac{0,312 * (0,2032 m)^{\frac{8}{3}} * (0,01)^{\frac{1}{2}}}{0,009}$$

$$Q = 0,049473802286 \frac{m^3}{\text{seg}} \rightarrow \text{Caudal a tubo lleno}$$

Características a tubo lleno y relación de caudales

$$\frac{Q_{Real}}{Q_{Tubo Lleno}} = \text{Máximo: } 0,85$$

$$\frac{0,003042 \text{ m}^3 \text{ seg}}{0,0494738 \text{ m}^3 \text{ seg}} = 0,06148709014 * 100 = 6,148\% = 6\%$$

Relación hidráulica para conductos circulares

$$0,61 \rightarrow V/v_0 = 0,473$$

$$D_H \rightarrow d/D_0 = 0,196$$

$$R_H \rightarrow R/R_0 = 0,481$$

• $V_0 =$ Velocidad a tubo lleno

• $D_0 =$ Diámetro interno del tubo

• $R_0 =$ Radio interno del tubo

$$V_0 = \frac{Q_{\text{Tubo Lleno}}}{A_{\text{Tubo Lleno}}}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \rightarrow \frac{\pi * (0,2032)^2}{4}$$

$$A = 0,03242927866 \text{ m}^2$$

$$V_0 = \frac{0,0494738 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,03242927866 \text{ m}^2/\text{l}} = 1,525590517 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$V_{\text{Real}} = V_0 * 0,645 = 0,9840 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$\frac{D_H}{D_0} = 0,196$$

$$D_H = 0,196 * D_0 \rightarrow 0,196 * 0,2032 \text{ m}$$

$D_H = 0,0398272 \text{ m} \rightarrow$ Profundidad hidráulica en la tubería

$$\frac{R_H}{R_0} = 0,481$$

$$D_H = 0,481 * D_0 \rightarrow 0,481 * 0,1016 \text{ m}$$

$R_H = 0,0488696 \text{ m} \rightarrow$ Radio hidráulico en la tubería

$$No. Fr = \frac{V_0}{\sqrt{g * D_H}} = \frac{1,525590515 \text{ m/seg}}{\sqrt{(9,81 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}) * (0,039872 \text{ m})}}$$

$No. Fr = 2,439323872 \rightarrow$ el fluido en la tubería lleva un comportamiento de flujo supercrítico, es decir la lámina de agua es muy pequeña

Fuerza Tractiva

$$\tau = \gamma \cdot R_H \cdot S$$

$$\tau = 9,81 \frac{KN}{m^3} * 0,0488696m * 0,01$$

$$\tau = 0,004794107 \frac{KN}{m^2} * \frac{1000}{1K}$$

$$\tau = 4,794107 \frac{N}{m^2} \rightarrow \text{Fuerza de tracción del fluido contra las paredes de la tubería}$$

Diseño de colectores (By-Pass) para el caudal del sistema productivo y las lagunas (agua lluvia)

$$Q_{(Total)} = Q_{piscinas} + Q_{corrales}$$

$$Q = 0,001194377 \frac{m^3}{seg} + 0,003042 \frac{m^3}{seg}$$

$$Q = 0,004236377 \frac{m^3}{seg} \rightarrow \text{Caudal Total para el diseño de By - Pass (caudal real)}$$

$$Q = \frac{0,312 * D^{\frac{8}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

- $n = 0,009 \rightarrow$ Coeficiente de Manning
- $S = 1\% \rightarrow 0,01$

- $\varnothing = 8'' \rightarrow 0,2032 \text{ m}$

$$Q_{(Tubo \text{ Lleno})} = \frac{0,312 * (0,2032 \text{ m})^{\frac{8}{3}} * (0,01)^{\frac{1}{2}}}{0,009}$$

$$Q = 0,049473802286 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \rightarrow \text{Caudal a Tubo lleno}$$

Características a tubo lleno y relación de caudales

$$\frac{Q_{Real}}{Q_{Tubo \text{ Lleno}}} = \text{Máximo: } 0,85$$

$$\frac{0,004236377 \text{ m}^3 / \text{seg}}{0,04947380286 \text{ m}^3 / \text{seg}} = 0,08562869145 * 100 = 8,56\% = 9\%$$

Relación hidráulica para conductos circulares

$$9\% \rightarrow V/v_0 = 0,620$$

$$D_H \rightarrow d/D_0 = 0,232$$

$$R_H \rightarrow R/R_0 = 0,554$$

$$V_0 = \frac{Q_{Tubo \text{ Lleno}}}{A_{Tubo \text{ Lleno}}}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \rightarrow \frac{\pi * (0,2032)^2}{4}$$

$$A = 0,03242927866 \text{ m}^2$$

$$V_0 = \frac{0,0494738 \text{ m}^3 / \text{seg}}{0,03242927866 \text{ m}^2 / \text{l}} = 1,525590517 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$V_{Real} = V_0 * 0,520$$

$$V_{Real} = 1,525590517 \frac{\text{m}}{\text{seg}} * 0,520$$

$$V_{Real} = 0,7933070688 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \rightarrow \text{La velocidad cumple con los requerimientos mínimos del RAS}$$

$$\frac{D_H}{D_0} = 0,232$$

$$D_H = 0,232 * 0,2032 \text{ m}$$

$D_H = 0,0471424 \text{ m} \rightarrow$ Profundidad hidráulica en la tubería

$$\frac{R_H}{R_0} = 0,554$$

$$D_H = 0,554 * 0,1016 \text{ m}$$

$R_H = 0,0562864 \text{ m} \rightarrow$ Radio hidráulico en la tubería

$$No. Fr = \frac{V_0}{\sqrt{g * D_H}} = \frac{1,525590515 \text{ m/seg}}{\sqrt{(9,81 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}) * (0,0471424 \text{ m})}}$$

$$No. Fr = 2,243353078$$

\rightarrow El número de Froude cumple con el requerimiento de diseño que establece el RAS

Fuerza Tractiva

$$\tau = \gamma \cdot R_H \cdot S$$

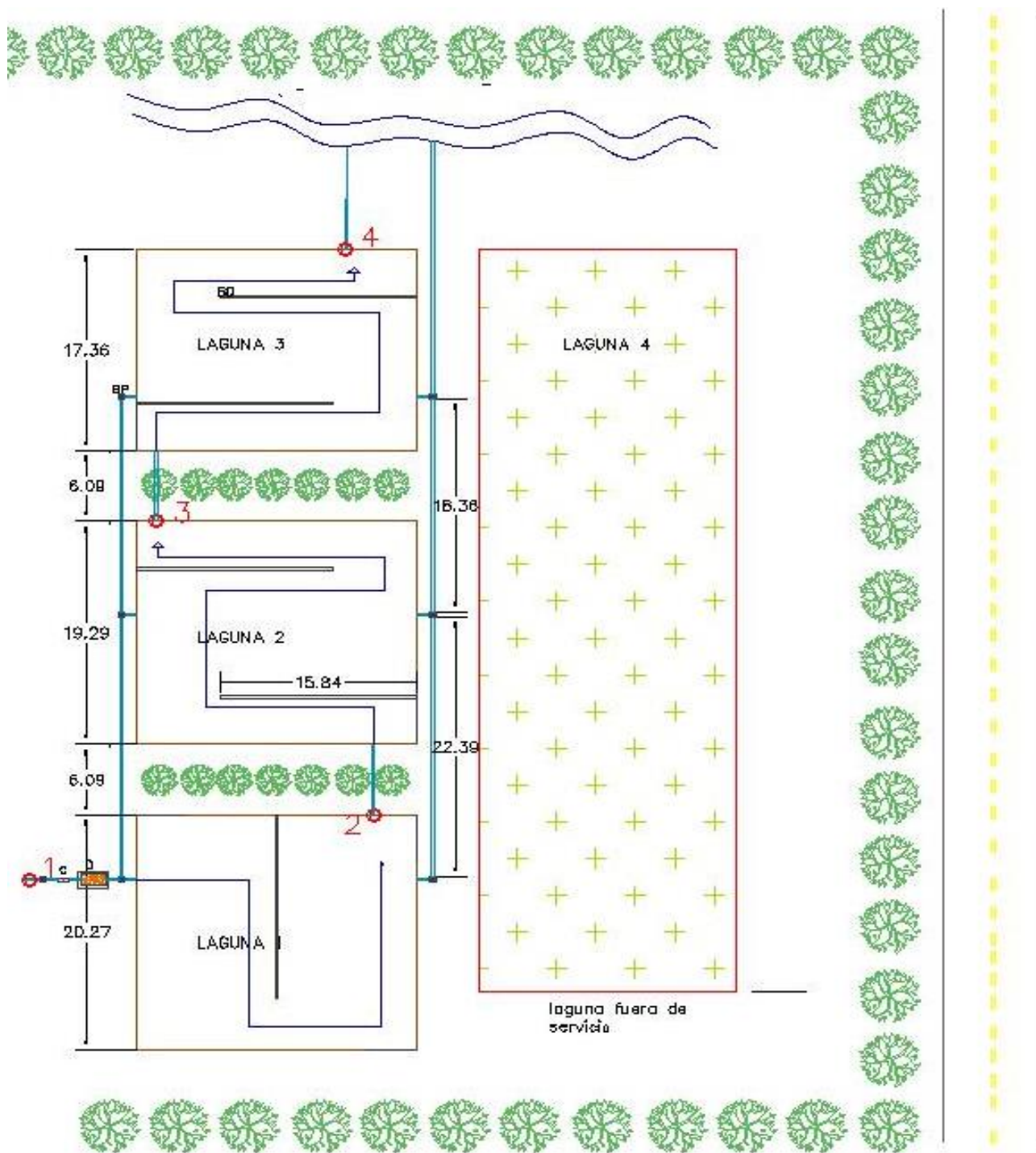
$$\tau = 9,81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} * 0,0562864 \text{ m} * 0,01$$

$$\tau = 0,005521695 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * \frac{1000}{1\text{K}}$$

La fuerza de tracción del fluido contra las paredes de la tubería es óptima para que el agua residual pueda fluir.

$$\tau = 5,521695 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Anexo 4. Alternativas de mejoramiento propuestas para el sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas en la colonia agrícola de mínima seguridad de acacias meta



Autores: Elaborado a partir de versión gratuita del software AutoCAD para estudiantes.

Referencias bibliográficas

Báscones, M. (2001). *Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes*. Obtenido de <http://www.cervantesvirtual.com/obra/utilizacion-agricola-del-estiercol-licuado-de-ganado-porcino-metodo-rapido-de-determinacion-del-valor-fertilizante-establecimiento-de-las-bases-para-el-diseno-de-un-optimo-plan-de-fertilizacion--0/>

Canosa, A. (1995). *Scielo Colombia*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2016, de Canosa, A. 1995. Indicadores Bacteriológicos de Eutrofización en los Embalses de Chuza, Neusa y Tominé, y en la Laguna de Chingaza. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Centro de Investigaciones Científicas. Santafé de Bogotá. Colombia. 196

Cardona, J., & García, L. (Diciembre de 2008). *Pontificia Universidad Javeriana*. Obtenido de <http://javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis204.pdf>

Concejo Municipal de Acacías Meta. (11 de Diciembre de 2011). *Alcaldía de Acacías Meta*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2016, de http://www.acacias-meta.gov.co/apc-aa-files/30373335666231373334643230663138/PBOT_ACACIAS.pdf

CORMACARENA & Asociación Colombiana de Porcicultores. (2015). *Guía Ambiental para Sistemas de Producción Porcícola en el Departamento del Meta*. Villavicencio: NMC Publicidad e Impresos.

Correa, C. (30 de Agosto de 2016). *Reseña histórica del Proceso Productivo de Porcicultura en La Colonia Agrícola de Mínima Seguridad de Acacías Meta*. (L. Cortés, Entrevistador)

Correa, G. (2008). *Universidad de Antioquia*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2016, de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/50/1/EvalMonitStmaLagunasStfeAnt.pdf>

Correa, G., Cuervo, H., Mejía, R., & Aguirre, N. (2012). *Scielo Colombia*. *Producción Más limpia*, VII(2), 36-51.

Cortés, C., & García, M. (2008). *Universidad de los Llanos*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2016, de <http://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/001/199/1/RUNILLANOS->

GES%200015%202008%20Formlacion%20delplan%20de%20manejo%20de%20vertimientos%20y%20augas%20residuales%20en%20el%20cola%20de%20pato%2c-Cort%C3%A9s%20Castillo%2c%20Caroll%20Edith.pdf

Cortés, F., Treviño, A., Alcorta, A., Sáenz, A., & Luis, G. (25 de Enero de 2013). *Optimización en el diseño de lagunas de estabilización con programación no lineal*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n2/v6n2a6.pdf>

Durán, Z. L. (2009). *Biblioteca Digital Universidad Nacional De Colombia*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1772/1/292518.2009.pdf>

Escalante, V. (2000). *CIAP - Centro de Información de Actividades Porcinas*. Obtenido de <http://www.ciap.org.ar/ciap/Sitio/Materiales/Investigacion/Publicaciones%20cientificas/Manejo%20de%20efluentes.pdf>

Escalante, V., & Garzón, M. (2010). Opciones de Tratamiento para Aguas Residuales de Tres Granjas Porcícolas. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, II(2), 87-90. Obtenido de <http://www.chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/doc/inagbi21121.pdf>

Escalante, V., Garzón, M., & Valle, S. (2012). Remoción de Macronutrientes en el Tratamiento de Aguas Residuales Porcícolas. *Ra Ximhai*, VIII(3), 75-82.

Garzón, M., & Buelna, G. (Febrero de 2013). *Scielo México*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2016, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n1/v30n1a6.pdf>

González, S. (Junio de 2013). Recuperado el 9 de Septiembre de 2016, de http://bibliodigital.itcr.ac.cr/bitstream/handle/2238/3077/optimizacion_planta_tratamiento_aguas_residuales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Goyenola, G. (Junio de 2007). *Asociación Civil Investigación y Desarrollo*. Obtenido de http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf

Guevara, A., & León, G. (1996). *Programa de Tratamiento de Aguas Residuales*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031278/031278-a.pdf>

Hanna Instruments Chile. (6 de Junio de 2017). Obtenido de <http://www.hannachile.com/productos>

Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2014). *Solicitud de información*. Recuperado el 2 de Octubre de 2016

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2016). *Boletín de Predicción Climática Y Alertas para Planear y Decidir*. Bogotá D.C.

Kellner, E., & Pires, E. (1998). *Lagoas de Estabilização- Projeto e Operação*. Río de Janeiro: ABES.

Lasbleiz, M. (1989). *Etude De Procèdes Chimiques D'epuration Du Lisier De Porc*.

Mara, D. (2004). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London: Earthscan.

Mara, D., & F., M. H. (s.f.). *IRC*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2016, de <http://www.ircwash.org/sites/default/files/341.1-87WA-2422.pdf>

Martinez, L. (2007). *Universidad de la Salle*. Recuperado el 26 de Octubre de 2016, de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14058/T41.07%20M366p.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Massachusetts Institute of Technology - (MIT). (2006). *Mitopencourseware*. Obtenido de https://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-85-water-and-wastewater-treatment-engineering-spring-2006/lecture-notes/115_reac_kine_2.pdf

Matsumoto, T., & Sánchez, I. (2016). Desempeño De La Planta de Tratamiento De Aguas Residuales De Sao Joao De Iracema (Brasil). *Ingeniería* , 176-186.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (MAGyP); Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2012). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i2094s.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (13 de Agosto de 2014). *Minambiente.gov.co*. Recuperado el 19 de Octubre de 2016, de

<http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Disponibilidad-del-recurso-hidrico/Resolucion-1207-de-2014.pdf>

Murphy, C. (Junio de 2012). *The University of Western Australia*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2016, de http://www.ceme.uwa.edu.au/__data/assets/pdf_file/0009/2158866/Murphy_THESIS_2012.pdf

Nelson, K., Jimenez, B., Tchobanoglous, G., & Darby, J. (2004). Sludge accumulation, Characteristics, and Pathogen Inactivation in Four Primary Waste Stabilization Ponds in Central Mexico. *Water Research*, 38(1), 111-127.

Núñez, F., Urrutia, F., Urcelay, S., & Oviedo, P. (1987). Estudio Microbiológico y Parasitológico de Excretas de Cerdo Sometidas a Biodigestión Anaeróbica en Laboratorio. *Avances en Ciencias Veterinarias*, II(1), 37-41.

Oliver, D., & Faz, C. (2009). *Utilización sostenible de purines de cerdo, con y sin tratamiento*. Obtenido de <http://congresos.um.es/icod/icod2009/paper/viewFile/5371/5161>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). *FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Organización Panamericana de La Salud & Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2005). *BVSDE-Organización Panamericana de La Salud*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2016, de http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/053_Dise%C3%B1o_tanques_s%C3%A9pticos_Imhoff_lag/Dise%C3%B1o_tanques_s%C3%A9pticos_Imhoff_lagunas_estabilizaci%C3%B3n.pdf

Pérez, L. (2005). *Universidad de Buenos Aires*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2016, de http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teor%C3%ADa_sedimentacion.pdf

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). (2009). *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)*. Recuperado el 29 de Agosto de 2016, de <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-15-water-pollution/>

- Rivas, A. (Octubre de 2002). *Método en Columna. Una Nueva Alternativa para El Muestreo de Lagunas de Estabilización*. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-117.pdf>
- Rodríguez, R. (Julio de 2011). *Universitat Politècnica de Catalunya*. Obtenido de http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12863/Rodriguez_Urioz_Raquel.pdf
- Rolim, S. (1999). *BVSDE - Organización Panamericana de la Salud*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal42/operacion.pdf>
- Rolim, S. (Febrero de 2006). *Universidad Nacional Autónoma de Honduras*. Obtenido de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Febrero2006/CD-2/pdf/spa/doc13030/doc13030-1.pdf>
- Romero, J. (2005). *Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ruiz, C., & Oviedo, C. (2013). *Cybertesis. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú*. Recuperado el 26 de Octubre de 2016, de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1613>
- Sierra, C. A. (2011). *Calidad del Agua - Evaluación y Diagnóstico*. Medellín: Universidad de Medellín.
- Stander, G., & Meiring, P. (1965). Employing Oxidation Ponds for Low-Cost Sanitation. *Journal*, 37(7), 1025-1033.
- Yáñez, F. (1982). *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*. Recuperado el 25 de Octubre de 2016, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan2/05862/05862-13.pdf>
- Yépez, A., Shintani, M., Tabora, P., Botero, R., Okumoto, S., & Tylor, R. (Diciembre de 2002). *Guía Práctica para el Uso de EM en la producción Animal Sostenible*. Guácimo, Limón, Costa Rica. Obtenido de http://images.engormix.com/externalFiles/6_produccion_animal_sostenible_com_em.pdf