

**PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD
DE AGUAS DE PRODUCCION VERTIDAS EN UN CAMPO
PETROLERO COLOMBIANO**

FREDY EDUARDO ESCALANTE GUTIERREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

**PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD
DE AGUAS DE PRODUCCION VERTIDAS EN UN CAMPOPETROLERO
COLOMBIANO**

FREDY EDUARDO ESCALANTE GUTIERREZ

**Monografía para optar al título de
Especialista en Producción de Hidrocarburos**

Director

M.Sc. CARLOS MAURICIO BARRETO CARVAJAL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A mi hijo Ángel Mathias Escalante Vesga,
quien a su corta edad es un ejemplo de lucha y alegría
día tras día.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Carlos Mauricio Barreto por su gran
Apoyo en el desarrollo e implementación del
Sistema objeto de este trabajo de monografía

FREDY

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVO GENERAL	18
1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. METODOLOGIA.....	20
4. MARCO TEÓRICO	21
4.1 TECNOLOGÍA DE LAGUNAS	21
4.1.1 Lagunas Anaerobias	22
4.1.2 Lagunas Facultativas.....	23
4.1.3 Lagunas Aireadas.	24
4.2 OXIDACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.	24
4.3 ORGANISMOS HETERÓTROFOS.....	24
4.4 REMOCIÓN DE AMONIO.....	25
4.5 ORGANISMOS AUTÓTROFOS.	26
5. PRUEBAS PRELIMINARES.	27
5.1 PRUEBA PILOTO INICIAL.....	27
5.2 SEGUNDA PRUEBA PILOTO.....	28
5.3 CALIDAD DEL AGUA A TRATAR.	29
5.4 OBJETIVO DE LA PRUEBA.....	30
5.5 DISEÑO DE LA PRUEBA.	32
5.6 RESULTADOS OBTENIDOS (PRUEBA PILOTO).	34
6. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	37
6.2 DIMENSIONAMIENTO DE LAS LAGUNAS DE SEDIMENTACIÓN Y REAIERACIÓN (5A y 5B).	39
6.3 REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO (aire).....	41
7. MODELACIÓN DE FLUJO DE LAS LAGUNAS.	43
8. EJECUCION	51
8.1 OBRA CIVIL	51
8.2 OBRA ELECTRICA	55
8.3 COMUNICACIÓN Y CONTROL.....	57

8.4 INSTALACION DE SOPLADORES.....	64
8.5 PATIN DE DOSIFICACION DE NUTRIENTES-BACTERIAS.....	66
8.6 BAFLES DEFLECTORES DE FLUJO.....	68
9. PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	70
10. RESULTADOS.....	74
11. CONCLUSIONES.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Complejidad Mecánica Y Su Relación Con El Reuerimiento De Área Y Energía.....	20
Figura 2 Relación Simbiotica De Algas Y Bacterias En Una Laguna Facultativa.	22
Figura 3 Relación Simbiotica De Algas Y Bacterias En Una Laguna Facultativa	22
Figura 4 Metabolismo Heterotrofo.	24
Figura 5 Metabolismo Autotrofo.	25
Figura 6 Vista General Del Primer Piloto De Aireación.	26
Figura 7 Esquema General De La Facilidat. Fuente Google Maps 2014	27
Figura 8 Primer Layout Del Sistema (Posteriormente Fue Modificado).	30
Figura 9 Etapas Del Proceso Y Predicción Del Comportamiento De Los Contaminantes De Interés.	31
Figura 10 Diagrama De Proceso E Instrumentos Para La Prueba Piloto.....	32
Figura 11 Esquema General De Distribución De Tanques Para La Prueba Piloto	32
Figura 12 Montaje De La Prueba Piloto En Campo.....	30
Figura 13 Remoción De DQO En Modo De Flujo Continuo	34
Figura 14 Remoción De DQO En Modo De Flujo Por Tandas	34
Figura 15 Degradación Del Lodo En El Fondo De La Laguna En Condiciones No Aireadas (Izq.) Y Aireadas (Der.)	40
Figura 16 Vista Esquemática General De Las Lagunas 4A, 4B, 5A Y 5B.....	42
Figura 17 Simulación De Flujo Libre Para La Laguna 4A.....	43
Figura 18 Simulación De Flujo Con Bafles De Control Para La Laguna 4A.....	44
Figura 19 Simulación De Flujo Con Configuración Óptima De Bafles.	45
Figura 20 Esquema De Descarga De Aire Desde El Soplador Hacia El Tenedor (Multiple De Distribución) Con Unión Bridada Para Conexión De Ramales.....	46
Figura 21 Esquema De Las Lineas Sumergidas (Bajantes O Droplines) De Distribución De Aire	47
Figura 22 Vista Aérea De La Facilidat. Se Observa En El Medio De La Imagen La Laguna 4a Sin Flujo Durante La Intervención De Adecuación De Terreno.....	50
Figura 23 Detalle De Laguna 4a Durante Actividades De Adecuación De Terreno.....	51
Figura 24 Bermas En Proceso De Instalación De Tuberías.	51
Figura 25 Detalle De Talud Perfilado Con Ramales Flotantes Sobre La Laguna 4B.....	52
Figura 26 Localización De Las Nuevas Plataformas.	53
Figura 27 Vista Inicial Plataforma Adicional Para Patín De Nutrientes (Chemdose). Laguna 4b.	53
Figura 28 Vista Final Plataforma Adicional Para Patín De Nutrientes (Chemdose). Laguna 4b.....	54
Figura 29 Proceso De Construcción De Los Bancos De Ductos, Laguna 5b.	54
Figura 30 Banco Principal A Lo Largo De La Berma Entre Lagunas 5A Y 5B.....	55
Figure 31 Centro De Control De Motores Ccm.....	55
Figura 32 Vista General De Ramales Y Sopladores Instalados.....	57
Figura 33 Estación De Armado De Ramales Laguna 4A.	58
Figura 34 Equipo De Termofusión Empleado En La Fabricación De Ramales Y Tenedores.....	58
Figura 35 Ramales En El Agua Luego De La Prueba De Hermeticidad Listos Para Ser Remolcados.	59
Figura 36 Racimos (Clusters) Ensamblados Previa Instalación.....	59
Figura 37 Posicionamiento De Ramales E Instalación De Bajantes (Droplines).	60
Figura 38 Ramales En Posición Anclados Con Cables De Acero.....	61
Figura 39 Se Observan Las Dos Mitades De Un Tenedor Listo Para Ser Ensamblado.	61
Figura 40 Proceso De Ensamble De Las Dos Mitades De Un Tenedor.....	62
Figura 41 Tenedor Terminado Listo Para Se Posicionado.....	62
Figura 42 Detalle De Acople Para Distribución De Aire Y Cambio De Material (De Acero A Polipropileno).	63
Figura 43 Vista Final Del Conjunto Soplador-Tenedor(Enterrado)-Ramales Flotantes.	63
Figura 44 Detalle De Sopladores Antes De La Instalación De Cabinas De Insonorización.....	64
Figura 45 Cabina De Insonorización En Proceso De Armado.....	64

Figura 46 Sopladores Con Cabina De Insonorización Terminada.	65
Figura 47 Patín De Dosificación De Nutrientes-Bacterias.	66
Figura 48 Área De Nutrientes En Proceso De Construcción.	66
Figura 49 Operario Preparando Uno De Los Baffles Para Ser Desplegado En La Laguna.	67
Figura 50 Detalle De Anclaje Para Pantalla Deflectora. Al Fondo En La Imagen Se Observa El Baffle En Posición.	68
Figura 51 Localización De Los Puntos De Muestreo.	70
Figura 52 Equipos Portables De Análisis De Calidad De Agua.	71
Figura 53 Toma De Muestras Y Medición De Parámetros De Calidad De Agua.	71
Figura 54 Labores De Limpieza De Líneas De Dosificación Y De Sondas Analíticas (Derecha. Sonda De Oxígeno Disuelto).	71
Figura 55 Inspección Diaria De Sopladores.	71
Figura 56 Inspección De Líneas De Aire (Desde Bote). Der. Preparación De Solución De Nutrientes/Bacterias.	77
Figura 57 Demanda Química De Oxígeno, Concentraciones De Entrada Y Salida Del Sistema.	74
Figura 58 Demanda Biológica De Oxígeno, Concentraciones De Entrada Y Salida Del Sistema.	74
Figura 59 Fenoles, Concentraciones De Entrada Y Salida Del Sistema.	75
Figura 60 HTP, Concentraciones De Entrada Y Salida Del Sistema.	75
Figura 61 Concentración De Oxígeno Disuelto Salida Del Sistema.	76
Figura 62 Oxígeno Disuelto, Curva De Agotamiento.	77
Figura 63 Concentración De Entrada Y Salida Amonio.	78
Figura 64 Remoción Acumulada De DQO.	79
Figura 65 Remoción Acumulada De Fenoles.	80
Figura 66 Remoción Acumulada De Hidrocarburos Totales.	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones de las lagunas antes de la intervención.....	28
Tabla 2 calidad del agua a tratar en el sistema de lagunas aireadas.....	29
Tabla 3 Parámetros y frecuencias de muestreo para la realización de la prueba piloto.	33
Tabla 4 REQUERIMIENTO CALCULADO DE NUTRIENTES.	36
Tabla 5 Resumen de cálculo del tiempo de retención crítico y producción de biomasa	39
Tabla 6 Resumen de cálculo de requerimiento de aire para las lagunas 5A y 5B	39
Tabla 7 Requerimientos de aire y factores de cálculo para el sistema.....	41
Tabla 8 Geometría de bafles para la Laguna 4A.	45
Tabla 9 Tabla resumen con los resultados de las simulaciones computacionales del flujo en las lagunas 4A, 4B, 5A y 5B.....	46
Tabla 10 Controlador sistema de aireación.	56
Tabla 11 Unidades y rangos de instrumentación.....	56
Tabla 12 Resumen de valores de calidad de agua a la entrada y salida del sistema.....	73

ANEXOS

ANEXO A TABLA DE ENTRADAS Y SALIDAS SISTEMA DE CONTROL CASETA DE NUTRIENTES	84
ANEXO B HOJA DE DATOS SOPLADORES LAGUNA 4A y 4B	87
ANEXO C HOJA DE DATOS SOPLADORES LAGUNA 5A y 5B	88

GLOSARIO

AMONIO: compuesto químico basado en nitrógeno formado por nitrógeno e hidrogeno, es la forma más reducida del nitrógeno en estado acuoso. Es altamente tóxico para la vida acuática. Se expresa en p.p.m. o en mg/L.

BAFLE o CORTINA: Se considera Baffle al elemento que se ubica en un cuerpo de agua para redireccionar el flujo con fines de homogenizar su distribución crear patrones de flujo específicos. Están fabricados en materiales plásticos no rígidos (geomembranas), se encuentran flotando y llevan anclajes a tierra en los costados.

CARGA ORGÁNICA: Es un término empleado en tratamiento de aguas para designar de forma general la materia que se encuentra presente en el agua en forma de contaminantes debidos a fuentes de origen orgánico (en forma de diferentes especies químicas) que hacen parte de la demanda biológica de oxígeno (DBO), la que a su vez es una fracción de la demanda química de oxígeno (DQO). No es un parámetro medible.

CLUSTER o RACIMO: Se considera un *cluster* al accesorio que va adosado a un *drop line*, al cual se conectan los difusores de aire.

DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO): también conocida como demanda bioquímica de oxígeno, se define como la cantidad de oxígeno requerida para oxidar por vías biológicas/bioquímicas la materia contaminante (biodegradable) presente en el agua. En el tratamiento de agua es un indicador de la contaminación debida a fuentes de origen orgánico. La DBO es una fracción de la DQO, por tal razón siempre su valor es menor. Se expresa en p.p.m. o en mg/L.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): Se define como la cantidad de oxígeno requerido para oxidar por vías químicas la materia contaminante presente en el agua. En el tratamiento de agua es un indicador del grado de contaminación. Se expresa en p.p.m. o en mg/L.

DIFUSOR: Se considera difusor al elemento que recibe aire del *cluster* y lo aplica al agua. Es un cilindro recubierto con una membrana sintética que permite el paso solo hacia afuera de burbujas de aire muy finas.

DROP LINE o BAJANTE: Se considera *Drop line* al tramo de tubería que se desprende de un ramal y que baja al fondo de la laguna hasta un *cluster*.

FENOLES: compuesto químico aromático formado por un anillo bencénico y un radical hidroxilo. Se presenta en el agua cuando hay contaminación de tipo orgánico y es común en presencia de hidrocarburos o sus derivados. Se expresa en p.p.m. o en mg/L.

LICOR MEZCLADO: Se define como la mezcla de agua residual-bacterias (biomasa) presente en un reactor biológico de tratamiento de agua.

LODOS: se definen como los sólidos generados en el proceso de tratamiento, están formados por bacterias que a medida que remueven la carga orgánica del agua se multiplican transfiriendo la materia de forma disuelta a biomasa.

MLSS (SSLM): *Mixed liquor suspended solids* sigla en inglés de sólidos suspendidos del licor mezclado, una forma de expresar la concentración estimada de biomasa en un reactor biológico de tratamiento. Se expresa en mg/L.

MÚLTIPLE DE DISTRIBUCIÓN: Se considera múltiple de distribución el tramo de tubería comprendido entre el múltiple de salida y los ramales.

MÚLTIPLE DE SALIDA: Se considera múltiple de salida el tramo de tubería comprendido entre la descarga de un soplador y el inicio de un múltiple de distribución.

O.D. (Oxígeno Disuelto): es la medida de la concentración de oxígeno que en condiciones específicas de presión y temperatura se encuentra disuelto en el agua. Se emplea como un indicador de ausencia de contaminación. Se expresa en p.p.m. o en mg/L.

p.p.m.: Partes por millón, es una unidad para expresar concentración de un soluto en un solvente definida en una escala de millonésimas. Es equivalente en magnitud a mg/L (miligramos por litro) y a g/m³ (gramos por metro cúbico).

pH: es la medida del potencial de hidrógeno presente en un medio. Se emplea como un indicador del carácter Ácido-Básico. Se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidronio [H⁺] presente en el agua. Se expresa en unidades de pH desde 0 (Ácido) hasta 14 (Básico) siendo 7 un pH neutro.

RAMAL: Se considera un ramal el tramo de tubería flotante que se encuentra después de un múltiple de distribución, de la cual se desprenden los *drop lines*.

SCFM: es la sigla en inglés de *standard cubic feet per minute* (pies cúbicos por minuto en condiciones estándar), una unidad empleada para la medición de flujo de fluidos compresibles.

SDT: Sólidos disueltos totales (TDS en inglés) es la medida de la concentración de sólidos disueltos (Filtrables) presentes en una muestra de agua. Se expresa en p.p.m. o en mg/L.

SOPLADOR: Equipo electromecánico que descarga aire en grandes volúmenes a presiones relativamente bajas.

SOTE: *Standard oxygen transfer eficiencia*, es un parámetro empleado para definir la eficiencia en la transferencia de oxígeno a la fase líquida en una unidad de aireación en condiciones estándar de presión y temperatura. Se expresa en porcentaje de oxígeno transferido por unidad de profundidad del tanque/laguna (%/m; %/ft).

SST: Sólidos suspendidos totales (TSS en inglés) es la medida de la concentración de sólidos suspendidos presentes en una muestra de agua. Se expresa en p.p.m. o en mg/L.

TIEMPO DE RETENCIÓN: Se define el tiempo de retención como el tiempo promedio teórico que una partícula permanece en un cuerpo de agua o tanque. Es el producto de dividir el volumen del contenedor entre la tasa de flujo (caudal) de trabajo.

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUAS DE PRODUCCION VERTIDAS EN UN CAMPO PETROLERO COLOMBIANO*

AUTORES: Fredy Eduardo Escalante Gutiérrez. Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Director M.Sc. Carlos Mauricio Barreto Carvajal.**

PALABRAS CLAVES: Demanda Biológica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Fenol, amonio, Oxígeno disuelto.

CONTENIDO:

En un campo petrolero en Colombia se emplearon lagunas aireadas para el tratamiento de aguas de producción. Debido a la gran cantidad de agua de producción a ser tratada en esta facilidad en particular, (2'400.000 BWPD) fue necesario diseñar un sistema que aprovechara al máximo la infraestructura existente manteniendo a la vez un nivel bajo de complejidad mecánica con el fin de minimizar los costos operativos. Los parámetros de calidad de agua más relevantes para el caso fueron fenoles, oxígeno disuelto y amonio debido a nueva legislación de vertimientos de agua residual. Las lagunas aireadas operan en una configuración de dos trenes de tratamiento en paralelo con dos lagunas en serie cada uno, las primeras dos lagunas en paralelo (Lagunas 4A y 4B) con 4 metros de profundidad y completamente aireadas; la segunda etapa (Lagunas 5A y 5B) con solo 1.5 metros de profundidad y aireación parcial. El sistema alcanzó los objetivos propuestos con valores promedio de descarga de 11, 23, 0.1 and 3 ppm para DBO, DQO, fenoles y amonio respectivamente. LA remoción de amonio funcionó durante un periodo de un mes y luego se detuvo debido a la presencia de sustancias tóxicas y a la pérdida de biomasa durante episodios de alto flujo en la facilidad. Durante la fase de puesta en marcha y operación del sistema se encontró una relación directa entre la disponibilidad de nutrientes y la remoción de fenoles. El sistema probó ser una buena alternativa para el pulimiento de aguas de producción, sin embargo, como cualquier sistema biológico es muy sensible a las condiciones ambientales especialmente a la toxicidad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Director: M.Sc. Carlos Mauricio Barreto Carvajal

ABSTRACT

TITLE: MOTION FOR IMPROVING THE QUALITY OF WATER DISCHARGED IN A FIELD PRODUCTION OIL COLOMBIAN.*

AUTHORS: Fredy Eduardo Escalante Gutiérrez. Faculty of Physical Chemistry Engineering. Petroleum Engineering School. Hydrocarbons Production Specialization. Director M.Sc. Carlos Mauricio Barreto Carvajal.

KEY WORDS: Biological oxygen demand, chemical oxygen demand, phenol, ammonia, dissolved oxygen.**

CONTENTS:

A series of aerated lagoons were used as post treatment to polish produced water from an oil facility in Colombia. Due to the large amount of produced water in this particular field (2'400.000 BWPD) it was necessary to design a system able to make use of the existent infrastructure keeping a low mechanical complexity in order to minimize the operational treatment costs. The most relevant water quality parameters were phenols, dissolved oxygen and ammonia as they were required by a new passing law for effluent discharges. The aerated lagoons were arranged as two parallel trains with two lagoons in series each, the first two in parallel (Lagoons 4A and 4B) 4 meter deep fully aerated, and the second stage (Lagoons 5A and 5B) only 1.5 meters deep with partial aeration. The system achieved the proposed goals reaching discharge average values of 11, 23, 0.1 and 3 ppm for BOD, COD, phenols and ammonia respectively. Ammonia removal worked for a one month period and then stopped because there were toxic compounds reaching the system and most of the biomass was washed out during high flow episodes. A direct relation between nutrients availability and phenols removal was identified during the start up and operation of the treatment system. The system proved to be a good alternative for produced water polishing, however as any other biologic system it is very sensitive to environmental changes specially toxicity.

* Bachelor Thesis

** Physicochemical Faculty of Engineering . School of Petroleum Engineering . Director : Director: M.Sc. Carlos Mauricio Barreto Carvajal

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales resultantes del proceso de producción de petróleo (aguas de producción) representan un reto desde el punto de vista técnico y ambiental, principalmente por su particular composición fisicoquímica y por los grandes volúmenes generados. Usualmente se pueden encontrar trazas de aceite en agua e hidrocarburos, valores medios de sólidos disueltos y otros compuestos principalmente orgánicos que aportan a la demanda química y biológica de oxígeno que causan el agotamiento del oxígeno disuelto en el agua de descarga. En el caso de la facilidad donde se desarrolló este proyecto, el mayor reto fue la magnitud del volumen a tratar (2'400.000 BWPD) lo cual requirió la aplicación de un sistema de tratamiento que aprovechara al máximo las facilidades existentes y cumpliera con los requerimientos de la nueva normativa de calidad de agua para vertimiento (Decreto 3930 de 2010), todo lo anterior sin causar interrupciones en la producción actual.

Para ello, se llevaron a cabo pruebas piloto que permitieran identificar la viabilidad de un tratamiento biológico en lagunas aireadas aprovechando las lagunas existentes en el campo, posteriormente, con la información obtenida de la prueba piloto se procedió a elaborar una ingeniería básica y de detalle. Una vez aprobados los documentos técnicos se entró a la fase constructiva que tuvo lugar durante cuatro meses, seguida de un periodo de operación supervisada por parte de la compañía a cargo de la construcción y operación.

Este trabajo de monografía resume el proceso llevado a cabo en las diferentes fases técnicas que permitieron concebir y desarrollar un sistema de tratamiento sin antecedentes en la industria del petróleo Colombiana. Está basado en información tomada de documentos técnicos (privados) y en entrevistas con el personal a cargo del diseño, construcción y operación del sistema, así como en mi experiencia personal durante estas etapas.

1. OBJETIVO GENERAL.

Proponer alternativas para el Tratamiento de las aguas de producción vertidas, con el fin de aumentar la concentración de oxígeno disuelto, reducir la concentración de fenoles y reducir la concentración de amonio.

1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recopilar información histórica para establecer una línea base sobre la calidad del agua de producción vertida y definir los valores objetivos que se quieren obtener.
- Realizar pruebas piloto para obtener los nuevos objetivos en el agua de producción vertida.
- Implementación y de sistema seleccionado para mejoramiento del agua según los resultados obtenidos en la prueba piloto.
- Reporte final de resultados con valores estables en el proceso.

2. JUSTIFICACIÓN

Durante el proceso de explotación de hidrocarburos se genera, además del crudo, algunas corrientes residuales o "de rechazo" que demandan diferentes niveles y tipos de tratamiento previo a su descarga en el ambiente o disposición final de acuerdo a la normativa ambiental del país.

Actualmente, la facilidad objeto de este estudio, produce un promedio de 2'000.000 BWPD con una capacidad máxima de hasta 2'400.000 BWPD, dado que se trata de una explotación madura con más de 25 años de operación, el BS&W (*water cut*) del fluido extraído presenta valores alrededor de 95 BW/BO lo cual genera un gran volumen de agua por tratar cada día.

Actualmente, la compañía a cargo de la operación del campo cuenta con un permiso de vertimientos, que dentro del marco de la licencia ambiental le permite descargar las aguas tratadas provenientes de sus procesos de producción, en un cuerpo de agua superficial adyacente a las facilidades de tratamiento y bombeo de crudo.

El permiso de vertimientos está condicionado al cumplimiento de los valores de calidad de agua especificador por la autoridad ambiental competente a cargo de la zona de influencia.

La compañía cuenta con facilidades y equipos de tratamiento que le permiten cumplir con las exigencias de la corporación ambiental; sin embargo, con la eminente entrada en vigencia del nuevo decreto que regula las concentraciones máximas permitidas a usuarios industriales según la actividad y el tipo de permiso de vertimiento, se hizo necesario anticipar el cambio de norma para prevenir sanciones y mejorar la calidad del agua efluente minimizando de esta forma el impacto al medio ambiente en la zona de influencia de la operación.

Adicionalmente, el gobierno está analizando un proyecto de resolución que modifica la normativa vigente para el vertimiento de aguas industriales.

El no cumplimiento de la nueva legislación Colombiana puede traer consecuencias como:

- Contaminación ambiental
- Sanciones por no cumplimiento con la nueva legislación
- Demandas económicas por las comunidades en el área de influencia
- Cancelación de licencia ambiental y cierre del Campo

3. METODOLOGIA

El método del presente trabajo de monografía es la revisión documental y entrevistas personales con el personal involucrado en el diseño, construcción y operación del sistema de tratamiento. En esta monografía se resumen las etapas desarrolladas dentro de la ejecución del proyecto de mejoramiento de la calidad de aguas en la facilidad las cuales fueron:

1. Análisis y caracterización de información recopilada en el proceso de oxigenación y enfriamiento de las aguas de producción, y su camino final a verter.
2. Ingeniería conceptual y diseño de planta piloto
3. Prueba en campo con planta piloto, análisis de resultados, recomendaciones de diseño y presupuesto.
4. Diseño de ingeniería en obra civil y sistema hidráulico. Especificaciones de equipos eléctricos, de control e instrumentación.
5. Construcción de obra civil según diseño y supervisión de la construcción.
6. Instalación de equipos eléctricos, de control e instrumentación.
7. Protocolo de pruebas y puesta en marcha del sistema.
8. Análisis en laboratorio de muestras de agua de producción y Seguimiento de parámetros hasta lograr los objetivos planteados y estabilidad en el proceso.

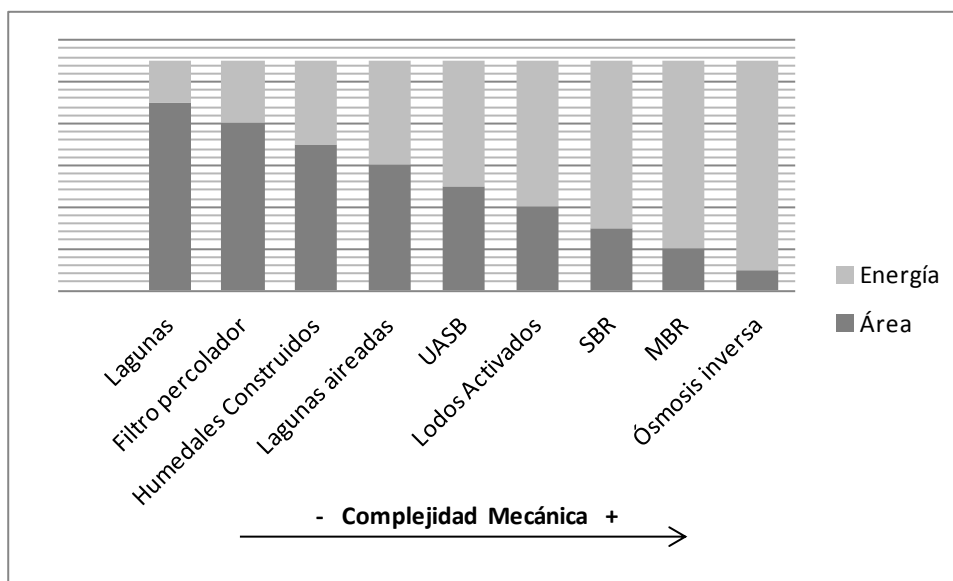
4. MARCO TEÓRICO

4.1 TECNOLOGÍA DE LAGUNAS

Los sistemas de tratamiento de aguas a base de lagunas han sido empleados desde hace más de un siglo con el primer sistema oficialmente registrado en 1901 construido en San Antonio Texas, inicialmente concebidas para la depuración de efluentes de origen doméstico, han sido empleadas en el tratamiento de aguas industriales cuando la disponibilidad de área no es una limitante para aprovechar los bajos costos operativos de este tipo de sistemas.

Si ordenamos las diferentes opciones de tratamiento de aguas de menor a mayor según su complejidad mecánica (el grado de mecanización de un sistema, el cual permite un mayor control activo) tendremos del lado de menor complejidad a los sistemas extensivos como las lagunas (que requieren una gran área con menor consumo de potencia), mientras que en el otro extremo tendremos los sistemas intensivos o más mecanizados como los sistemas de membranas (con un área requerida mínima a un costo energético mayor, y con un elevado nivel de control sobre el proceso de tratamiento).

FIGURA 1 COMPLEJIDAD MECÁNICA Y SU RELACIÓN CON EL REUERIMIENTO DE ÁREA Y ENERGÍA.



Algunas de las ventajas de este tipo de sistemas son:

- Remoción efectiva de la DBO
- Sistemas de baja complejidad mecánica lo cual implica procesos simplificados de construcción, operación y mantenimiento.
- Bajos requerimientos de Energía
- Manejo de lodos simplificado
- Buena remoción de patógenos, por tanto el efluente puede ser reusado.

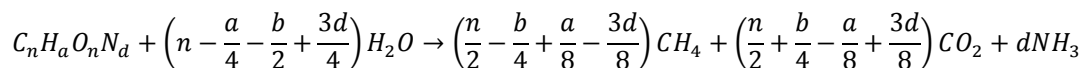
Dentro de las desventajas se encuentran:

- Grandes requerimientos de área por ser sistemas extensivos
- Su rendimiento es altamente dependiente de la temperatura ambiente
- Pueden ser una fuente de olores ofensivos
- Por su baja complejidad mecánica el control operativo que se puede aplicar es mínimo.

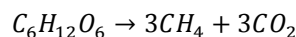
A grandes rasgos, las lagunas de tratamiento se pueden dividir en tres grupos principales así:

4.1.1 LAGUNAS ANAEROBIAS

Típicamente se ubican al inicio del esquema de tratamiento dado que por sus características pueden manejar cargas contaminantes mayores que otros tipos de lagunas (0.1 a 0.3 Kg COD/m³/d)¹. Este tipo de lagunas normalmente opera con tiempos de retención alrededor de 1 a 3 días y profundidades entre 3 y 5 m, en estas lagunas se desarrollan bacterias que en ausencia de oxígeno (condiciones anaerobias) degradan la materia orgánica presente en el agua residual, produciendo como residuo del proceso metabólico principalmente metano, dióxido de carbono y otros gases en menores concentraciones comúnmente llamados Biogás de acuerdo a las siguiente ecuación general.



O su versión simplificada:



La digestión anaerobia tiene como ventaja frente a la aerobia su baja producción de lodos (biomasa producida en el proceso de digestión), este aspecto es de gran importancia ya que la mayoría de la carga contaminante que ingresa al sistema será convertida en Biogás (cerca del 90%) aprovechable para generación de energía en turbinas de ciclo combinado, y tan solo una pequeña fracción (alrededor del 10%) se convertirá en biomasa anaerobia, reduciendo así los requerimientos de manejo y disposición de lodos.

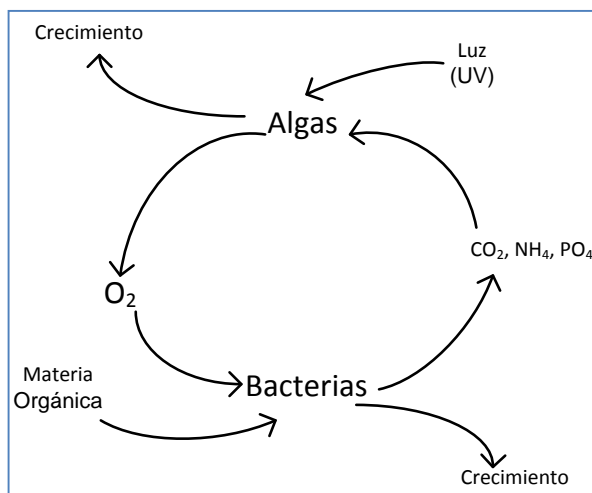
El uso de bacterias anaerobias en lagunas es una de las formas más primitivas teniendo en cuenta la gran variedad de aplicaciones que hay disponibles hoy en día que involucran tecnologías biológicas para la transformación de corrientes residuales en subproductos aprovechables. Sistemas UASB (Upflow anaerobic sludge blanket), EGSB (Expanded granular sludge blanket y reactores ANNAMOX son las versiones modernas del biotratamiento anaerobio, ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas industriales de alta carga contaminante principalmente en Europa.

¹ Waste Stabilization Ponds. UNESCO IHE. Van Der Steen, Peter, 2009

4.1.2 LAGUNAS FACULTATIVAS.

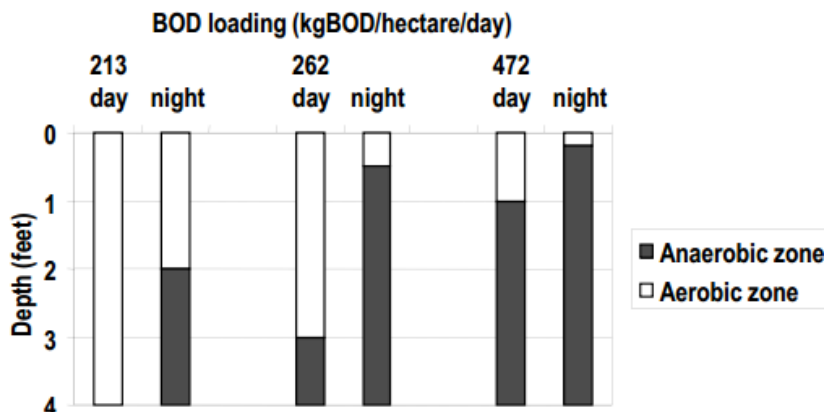
Son una versión combinada en donde de forma simultánea se dan los procesos aerobio y anaerobio dado que la laguna se estratifica verticalmente con una zona rica en oxígeno cerca de la superficie y una zona con ausencia de éste cerca del fondo. En la capa superior, son las micro algas quienes a partir de la radiación UV proveniente del sol liberan O₂ luego de la fotosíntesis, el oxígeno es aprovechado por las bacterias de la capa intermedia que a su vez liberan CO₂ y nutrientes que son aprovechados por las algas en una relación simbiótica.

FIGURA 2 RELACIÓN SIMBIOTICA DE ALGAS Y BACTERIAS EN UNA LAGUNA FACULTATIVA.



A medida que se desciende por la laguna, la concentración de O₂ disminuye haciendo favorables las condiciones para el desarrollo de organismos anaerobios, el espesor de esta capa aerobia varía a lo largo del día en función de la penetración de la luz solar y de la carga de DBO aplicada.

FIGURA 3 RELACIÓN SIMBIOTICA DE ALGAS Y BACTERIAS EN UNA LAGUNA FACULTATIVA



Fuente: Waste Stabilization Ponds. Van Der Steen, Peter, 2009

4.1.3 LAGUNAS AIREADAS.

Las lagunas aireadas combinan las ventajas de un sistema biológico extensivo (de baja complejidad) con las de un sistema aireado artificialmente lo cual provee mayor control sobre el proceso. Dado que la tasa de transferencia de oxígeno es mayor en sistemas mecánicamente asistidos, la carga que se puede aplicar en este tipo de lagunas es mayor y por tanto se puede realizar el tratamiento con un menor tiempo de retención que el requerido por un sistema pasivo. El diseño de este tipo de lagunas se realiza siguiendo el mismo método que para sistemas de lodos activados, la laguna aireada se considera un reactor aerobio de baja concentración de sólidos suspendidos del licor mezclado SSLM.

4.2 OXIDACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.

La remoción de la carga orgánica de un agua residual está dada básicamente por la fracción de la DQO (demanda química de oxígeno) que es biodegradable o susceptible a ser degradada por vías biológicas, dicha fracción se conoce como DBO (Demanda biológica de oxígeno). La relación entre DQO/DBO determina el carácter biodegradable de un efluente residual y por tanto, la viabilidad de ser tratado empleando un sistema biológico.

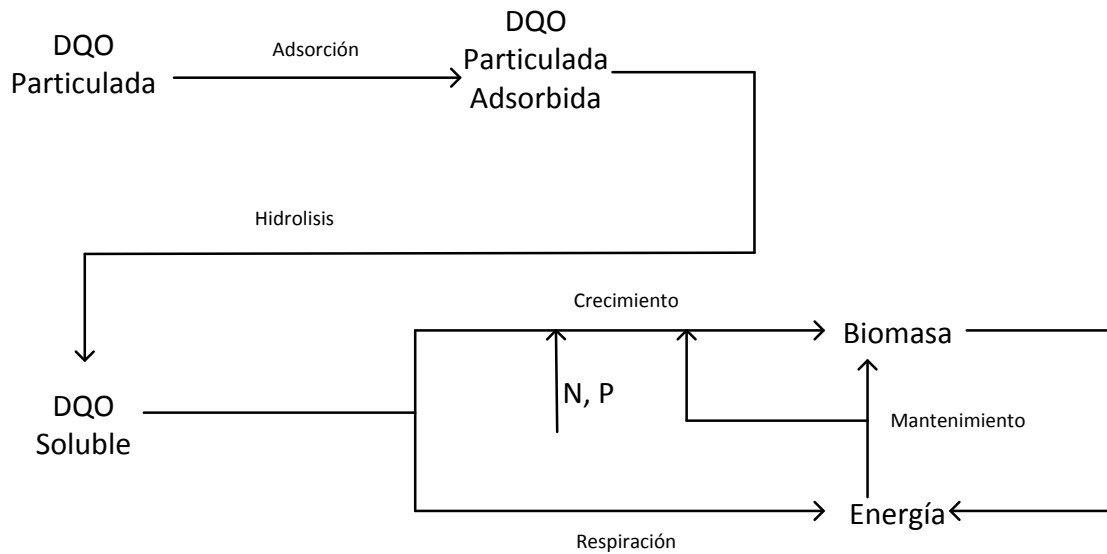
Se ha establecido como límite máximo para la relación DQO/DBO un valor de 3, lo cual quiere decir que al menos un tercio de la carga orgánica presente en el agua residual es de carácter biodegradable, lo cual hará viable un tratamiento bacteriano.

4.3 ORGANISMOS HETERÓTROFOS.

Los organismos heterótrofos (O.H.) son los encargados de remover la fracción de carbono de la demanda biológica de oxígeno DBO. La fracción soluble de la DBO es asimilada rápidamente por los O.H. y es usada en procesos de respiración y crecimiento; la fracción particulada o no soluble por el contrario, debe ser primero hidrolizada a fin de reducir el tamaño de los compuestos orgánicos a una escala que sea asimilable por los O.H., una vez hidrolizados estos ingresan al ciclo metabólico. Ver Figura 4 METABOLISMO HETEROTROFO.)

Estos organismos se encuentran de forma natural en las aguas residuales y bajo las condiciones de aireación de un sistema de tratamiento se desarrollan a concentraciones medias (3-5 g/L) típicamente en un rango de temperaturas desde 12 a 36°C, el rango de pH para su desarrollo va de 6.5 a 9 unidades. Se caracterizan por tolerar cambios ambientales gracias a su alta capacidad de adaptación.

Figura 4 METABOLISMO HETEROTROFO².

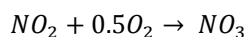
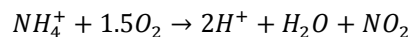


4.4 REMOCIÓN DE AMONIO.

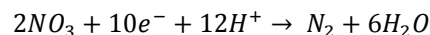
El amonio es la especie química más reducida del nitrógeno, su remoción se da vía oxidación a nitrato gracias a la acción de organismos especializados (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*), seguida del proceso de denitrificación el cual es llevado a cabo por organismos heterótrofos que usan el nitrito como aceptor alternativo de electrones en ausencia de oxígeno disuelto (condiciones anóxicas).

El proceso se desarrolla en dos etapas así:

Nitrificación



Denitrificación



Los últimos avances en este tema están encaminados a mejorar la eficiencia energética pasando de NH_4 a NO_2 y de ahí directamente a N_2 en un proceso anaerobio conocido como *nitritation* en inglés, gracias a una especie bacteriana descubierta en 1999 que se conoce comercialmente como ANAMMOX, el método fue desarrollado en la *Delft University of Technology* en Holanda y promete revolucionar el tratamiento de aguas industriales ya que es capaz de manejar cargas contaminantes altas con costos operativos muy bajos.

² Rich, Linvil. High performance aerated lagoon systems. American Academy of Environmental Engineers, 1999

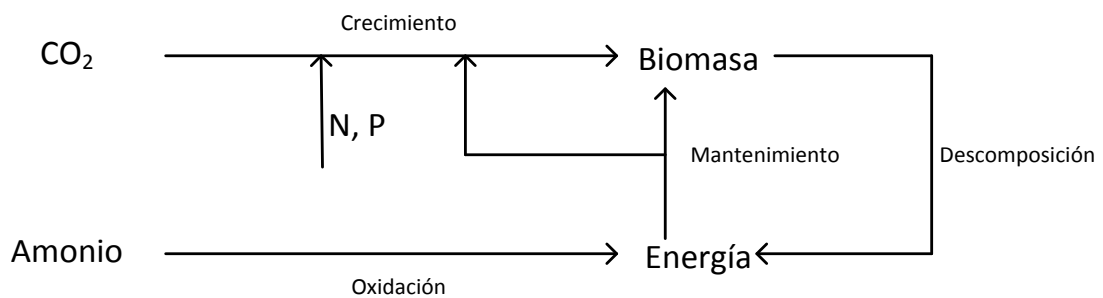
4.5 ORGANISMOS AUTÓTROFOS.

Los organismos autótrofos a los que se hace referencia en este documento son aquellos involucrados en los procesos de nitrificación, principalmente los grupos *Nitrosomonas* y *nitrobacter*. Estos dos grupos de microorganismos se encargan de la oxidación de amonio a nitrito y nitrato a partir de CO_2 como fuente de carbono.

A diferencia de los O.H. estos son menos resistentes a variaciones de las condiciones ambientales aunque sobreviven en rangos de pH (de 6 a 9) y temperatura (de 20 a 30°C) similares por ser también mesófilos.

Su tasa de crecimiento específica es menor que la de los O.H razón por la cual se complica la operación de sistemas que incluyan la oxidación de amonio por esta vía.

FIGURA 5 METABOLISMO AUTOTROFO³.



³ Rich, Linvil. High performance aerated lagoon systems. American Academy of Environmental Engineers, 1999

5. PRUEBAS PRELIMINARES.

5.1 PRUEBA PILOTO INICIAL (Aplicación de Ozono).

La empresa operadora ha realizado pruebas para controlar fenoles y amonio empleando aireación y oxidación. Algunas de ellas se hicieron aplicando aire con inyector tipo venturi, por otro lado, las pruebas de oxidación se desarrollaron con la aplicación de ozono a través de difusores de membrana.

Inicialmente se realizaron una serie de pruebas a escala para determinar la viabilidad de diferentes métodos de tratamiento en la facilidad. Se probó la tecnología de oxidación avanzada a partir de ozono generado in situ y aplicado a través de una red de difusores sumergidos en un área de 100 m² en la laguna 5B en el año 2009. En este ensayo se trataron 400.000 BWPD con un flujo de aire ozonizado de 1500 scfm.

La concentración de oxígeno disuelto aumentó temporalmente, pero fue rápidamente consumida a lo largo de la laguna a medida que se oxidan los fenoles y la materia orgánica. la concentración de fenoles se redujo en un 78% con este método (de 0.4 ppm a 0.083 ppm), mientras que la DQO bajó de 30 ppm a 21 ppm. Ningún efecto se evidenció sobre la remoción de amonio durante estas pruebas.

Los resultados obtenidos en esta primera prueba fueron altamente satisfactorios desde el punto de vista técnico (remoción de contaminantes) pero a un costo operativo muy elevado, razón por la cual fue descartada esta alternativa luego de un mes de operación.

FIGURA 6 VISTA GENERAL DEL PRIMER PILOTO DE AIREACIÓN.



5.2 SEGUNDA PRUEBA PILOTO (Aireación y tratamiento biológico).

El propósito de la segunda prueba piloto fue probar que el sistema de aireación puede ser empleado para el tratamiento de este efluente alcanzando los resultados esperados. De igual manera, se obtendrían datos de diseño relevantes como tiempo de retención mínimo y concentraciones de salida que se pueden lograr.

El agua a tratar viene de los separadores de aceite (unidades WEMCO) y posteriormente su temperatura es reducida usando un sistema de aspersion y lagunas de enfriamiento (ver esquema general de la facilidad). El proceso de aspersion permite un intercambio de oxigeno marginal que es rápidamente consumido y por tanto despreciable. El agua fluye por una serie de lagunas para finalmente ser descargada en un cuerpo de agua natural adyacente a la facilidad en donde la autoridad ambiental ha autorizado el vertimiento.

Las lagunas originalmente tenían una profundidad de 1.5m (en promedio), las dimensiones y tiempos de retención originales de las lagunas se muestran en la tabla a continuación. En las lagunas 1 a la 3 ocurren principalmente procesos de separación de fases y enfriamiento, mientras que la mayoría del proceso de sedimentación y desnatado ocurre en las lagunas 4, 4A, 4B, 5A y 5B. (Ver esquema general de la facilidad).

FIGURA 7 ESQUEMA GENERAL DE LA FACILIDAD. FUENTE GOOGLE MAPS 2014



TABLA 1 DIMENSIONES DE LAS LAGUNAS ANTES DE LA INTERVENCIÓN

<i>Laguna</i>	<i>Area (Ha)</i>	<i>Profundidad (m)</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Tiempo de retención (HRT)</i>
<i>1</i>	<i>1.97</i>	<i>1.5</i>	<i>29,550</i>	<i>1.86</i>
<i>2</i>	<i>1.3</i>	<i>1.5</i>	<i>19,500</i>	<i>1.23</i>
<i>3</i>	<i>2.32</i>	<i>1.5</i>	<i>34,800</i>	<i>2.19</i>
<i>4</i>	<i>7.44</i>	<i>1.5</i>	<i>111,600</i>	<i>7.02</i>
<i>4A</i>	<i>3.2</i>	<i>1.5</i>	<i>48,000</i>	<i>3.02</i>
<i>4B</i>	<i>2.48</i>	<i>1.5</i>	<i>37,200</i>	<i>2.34</i>
<i>5A</i>	<i>4.37</i>	<i>1.5</i>	<i>65,550</i>	<i>4.12</i>
<i>5B</i>	<i>4</i>	<i>1.5</i>	<i>60,000</i>	<i>3.77</i>
<i>Total</i>	<i>27.08</i>		<i>406,200</i>	<i>25.55</i>

5.3 CALIDAD DEL AGUA A TRATAR.

E agua a tratar tiene valores de contaminantes relativamente bajos, esto debido a que ya ha sido tratada previamente y lo que se busca hacer es un pulimiento para mejorar la calidad del vertimiento.

Las concentraciones promedio de DQO, DBO y aceite en agua varían dentro de un rango +/-30% de acuerdo a la eficiencia del tratamiento realizado en la facilidad de producción (Desnatado, rompimiento de emulsión, flotación y enfriamiento).

TABLA 2 CALIDAD DEL AGUA A TRATAR EN EL SISTEMA DE LAGUNAS AIREADAS.

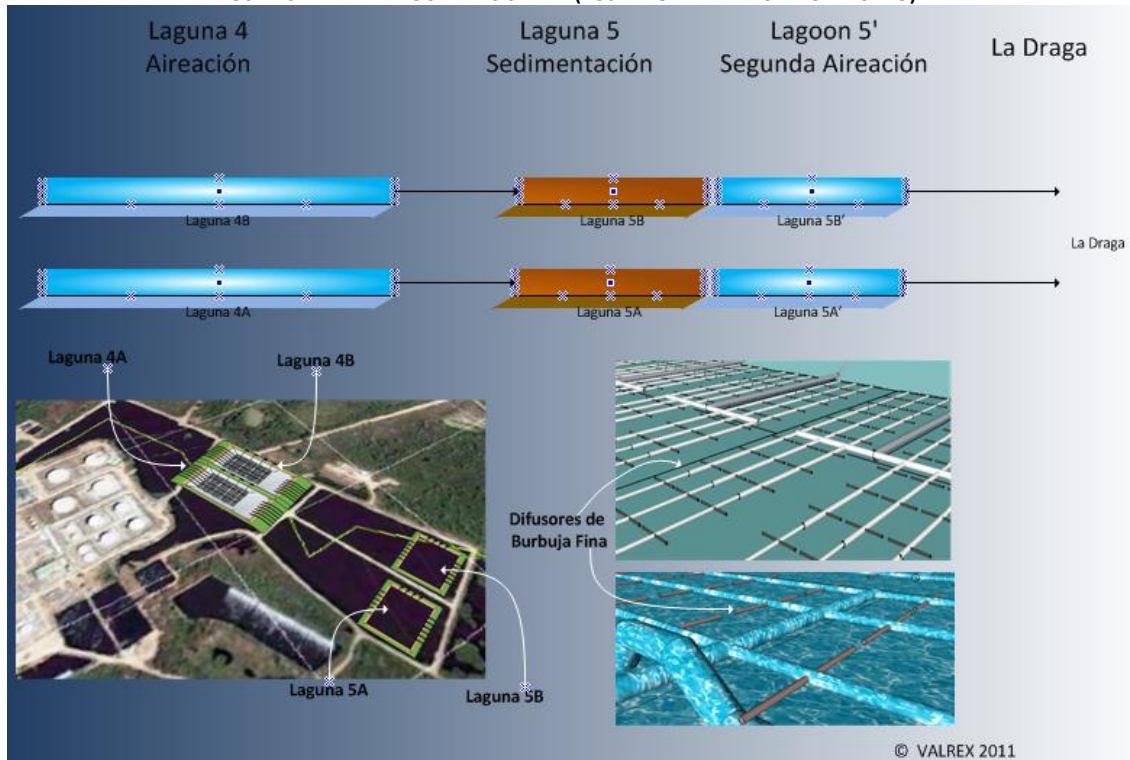
<i>Parámetro</i>	<i>unidad</i>	<i>Agua cruda</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Norma vigente</i>	<i>Proyecto de Norma (3930-10)</i>
<i>Temperatura</i>	<i>°C</i>	32	<40	<i>Remoción del 80%</i>	<40
<i>pH</i>		8.1	5-9	5-9	6-9
<i>Conductividad</i>	<i>μS/cm</i>	608	N/A	<1000	<1000
<i>Oxígeno disuelto</i>	<i>mg/L</i>	1.2	4	N/A	>4
<i>Oil in water</i>	<i>mg/L</i>	1.78	N/A	N/A	<20
<i>Fenoles</i>	<i>mg/L</i>	0.4	0.1	N/A	<0.2
<i>Cloruros</i>	<i>mg/L</i>	26	N/A	N/A	N/A
<i>Sólidos suspendidos totales</i>	<i>mg/L</i>	23	N/A	<i>Remoción del 80%</i>	180
<i>Sólidos sedimentables</i>	<i>mg/L</i>	0.2	<10	N/A	5
<i>DQO</i>	<i>mg/L</i>	61.11	N/A	<i>Remoción del 80%</i>	400
<i>DBO5</i>	<i>mg/L</i>	45.89	<50	<i>Remoción del 80%</i>	200
<i>NH3-N</i>	<i>mg/L</i>	4.6	0.8	N/A	N/A
<i>Ortofosfatos-P</i>	<i>mg/L</i>	0.07	N/A	N/A	N/A
<i>Alcalinidad</i>	<i>mg/L</i>	236	N/A	N/A	N/A
<i>Dureza</i>	<i>mg/L</i>	93	N/A	N/A	N/A
<i>Fósforo</i>	<i>mg/L</i>	0.1	N/A	N/A	3
<i>Sulfuro</i>	<i>mg/L</i>	0.01	N/A	N/A	2
<i>Turbiedad</i>	<i>NTU</i>	18.46	N/A	N/A	N/A

La corporación ambiental con jurisdicción en el área de influencia expidió una resolución de vertimientos específica para la compañía, en la Tabla 2 calidad del agua a tratar en el sistema de lagunas aireadas.) se muestran los valores de dicha resolución y los valores de calidad de agua requeridos por el proyecto de norma del decreto 3930 de 2010, el cual se convertirá en el nuevo objetivo una vez entre en vigor la respectiva resolución reglamentaria.

5.4 OBJETIVO DE LA PRUEBA.

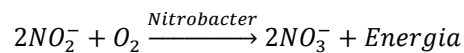
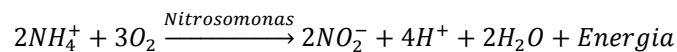
El ensayo se realizó para validar la posibilidad de realizar el tratamiento de este tipo de efluente por vías biológicas. Se planteo realizar modificaciones a las lagunas existentes con el fin de realizar procesos de aireación-nitrificación-sedimentación en diferentes etapas del tratamiento como se muestra en las figuras 2 y 3.

FIGURA 8 PRIMER LAYOUT DEL SISTEMA (POSTERIORMENTE FUE MODIFICADO).



Concepto del tratamiento (para ser probado en el ensayo piloto)

La primera etapa del tratamiento consiste en aplicar una gran corriente de aire para promover la oxidación de compuestos orgánicos y fenoles (Laguna 4, Aireación). Allí, una fracción de la DQO será transformada en lodos (biomasa), la fracción no biodegradable de la DQO será removida vía sedimentación en la siguiente etapa de tratamiento. De igual manera, en la zona de aireación (Laguna 4), el nitrógeno en forma de amonio será oxidado a nitrito y posteriormente a nitrato vía bacterias nitrificantes (*nitrosomonas* y *nitrobacter*) mediante las siguientes reacciones en un proceso de dos etapas:

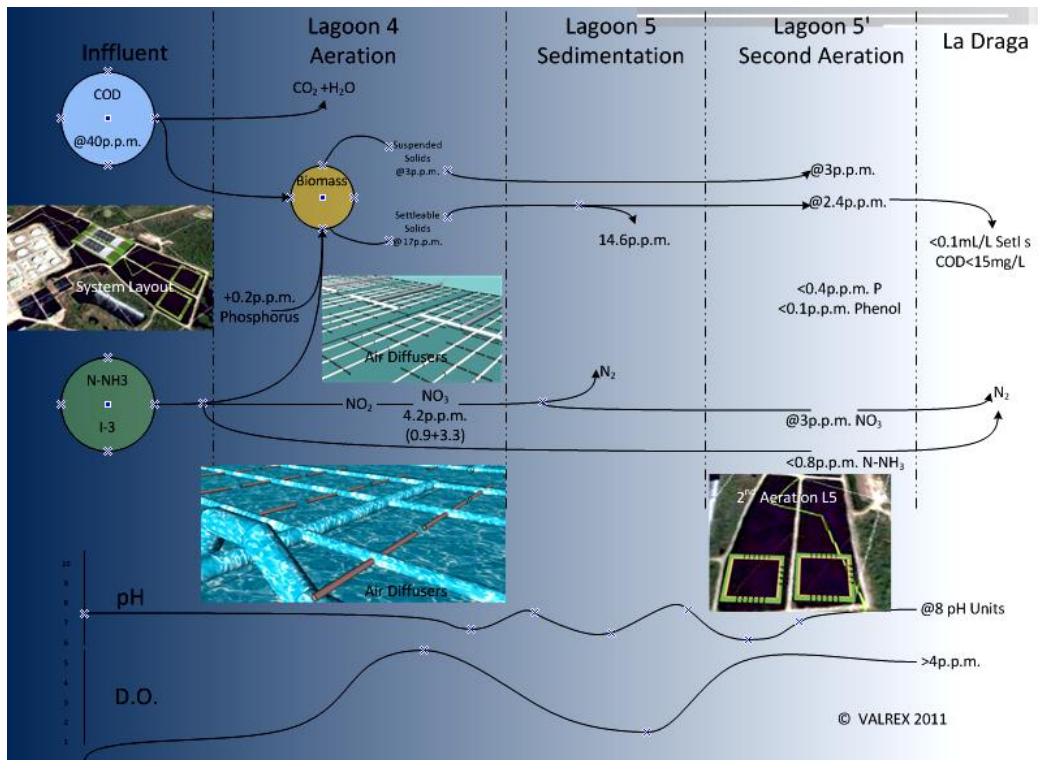


Luego de la fase de aireación, el agua ingresa a la laguna 5 (5A y 5B, Sedimentación) en donde no se aplica aire para promover condiciones hidráulicas que favorezcan la sedimentación de los lodos formados en la etapa anterior. Junto con el lodo, la fracción insoluble no biodegradable de la DQO será removida por barrido en el mismo proceso de sedimentación.

En la segunda mitad de las lagunas 5 (5'A y 5'B segunda aireación) se aplicará nuevamente una corriente de aire con una intensidad mucho menor que la inicial. El propósito de esta segunda aireación es recuperar el oxígeno disuelto que ha

sidio consumido en la degradación de la materia orgánica en la etapa de sedimentación. En la Figura 9 Etapas del proceso y predicción del comportamiento de los contaminantes de interés.) se ilustra de forma esquemática el flujo de los contaminantes de interés y sus conversiones en otras especies químicas, asimismo, la predicción de las variaciones de pH y Oxígeno disuelto (D.O.) para el sistema.

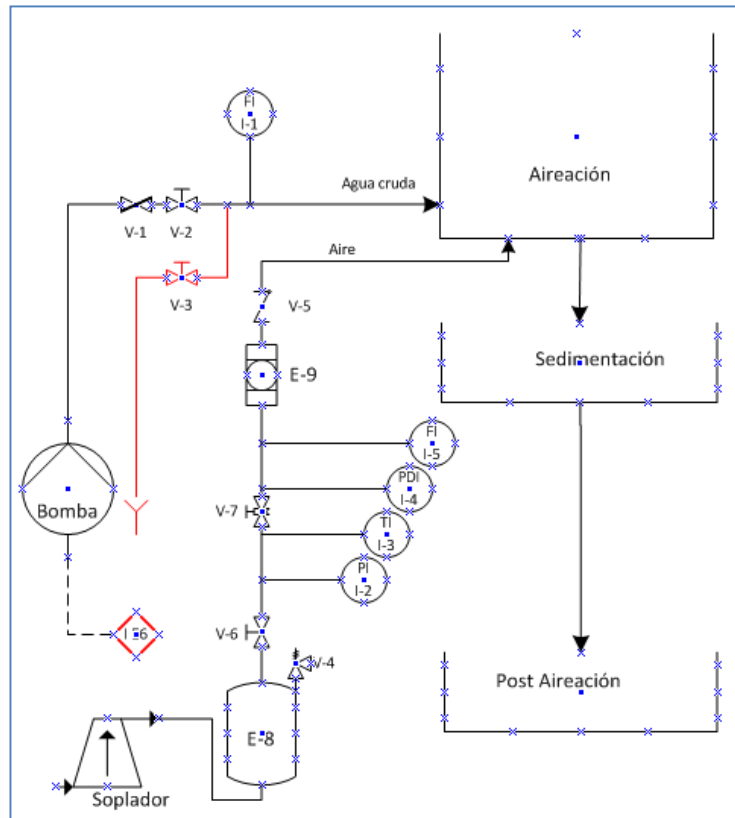
FIGURA 9 ETAPAS DEL PROCESO Y PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES DE INTERÉS.



5.5 DISEÑO DE LA PRUEBA.

La prueba se realizó empleando una serie de tanques cuyos volúmenes fueron determinados siguiendo el propósito de simular las condiciones de tiempo de retención de las lagunas existentes con zonas de Aireación, sedimentación y post aireación de acuerdo al siguiente diagrama de proceso.

FIGURA 10 DIAGRAMA DE PROCESO E INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA PILOTO



Se determinó tomar muestras en los siguientes puntos:

- Punto A: Agua cruda
- Punto B: Tanque de aireación
- Punto C: Tanque de sedimentación
- Punto D: Tanque de post aireación

FIGURA 11 ESQUEMA GENERAL DE DISTRIBUCIÓN DE TANQUES PARA LA PRUEBA PILOTO

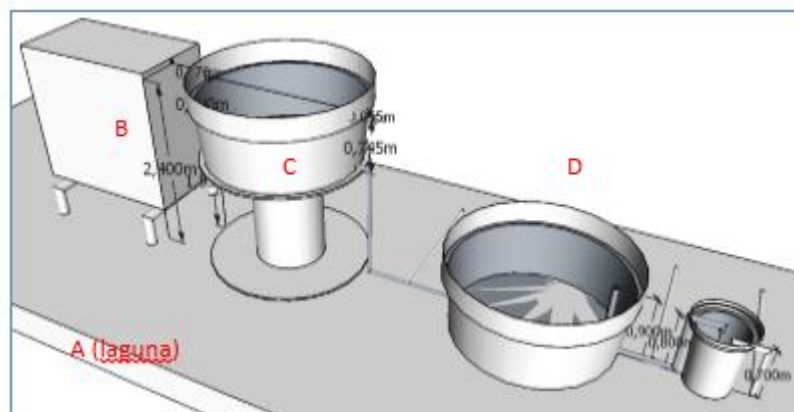


FIGURA 12 MONTAJE DE LA PRUEBA PILOTO EN CAMPO



Frecuencia de muestreo

Se determino realizar el monitoreo de los parámetros de calidad de agua más relevantes para el pre diseño de la siguiente manera:

TABLA 3 PARÁMETROS Y FRECUENCIAS DE MUESTREO PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRUEBA PILOTO.

<i>Parámetro</i>	<i>Punto de muestreo</i>	<i>Frecuencia</i>
<i>Fenoles</i>	<i>A,B</i>	<i>Diaria</i>
<i>DQO</i>	<i>A,B</i>	<i>Diaria</i>
<i>DBO</i>	<i>A,B</i>	<i>Semanal</i>
<i>pH</i>	<i>A,D</i>	<i>Diaria</i>
<i>Temperatura</i>	<i>A</i>	<i>Diaria</i>
<i>Amonio</i>	<i>A,B,D</i>	<i>Diaria</i>
<i>Oxígeno Disuelto</i>	<i>B,D</i>	<i>Diaria</i>
<i>Sólidos suspendidos</i>	<i>A,B,C,D</i>	<i>Diaria</i>
<i>Sólidos sedimentables</i>	<i>B</i>	<i>Diaria</i>

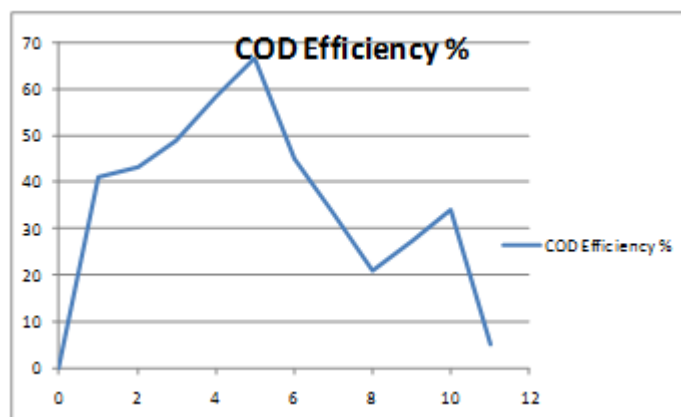
5.6 RESULTADOS OBTENIDOS (Prueba piloto).

El objetivo principal de este ensayo piloto fue realizar una prueba de concepto con una respuesta afirmativa o negativa a una pregunta simple, es posible tratar este efluente industrial en particular empleando un sistema biológico en lagunas aireadas? La respuesta, de acuerdo con los resultados obtenidos fue sí.

1. Reducir la concentración de fenoles a valores <0.1 ppm
 - ✓ La concentración de fenoles es menor a 0.1 ppm después del tratamiento
2. Reducir la concentración de amonio a valores <0.8 ppm
 - ✓ La concentración de amonio es menor a 0.8 ppm luego de la aireación
3. Aumentar la concentración de Oxígeno disuelto a valores >4 ppm
 - ✓ La concentración de oxígeno disuelto es mayor a 4 ppm luego de la aireación

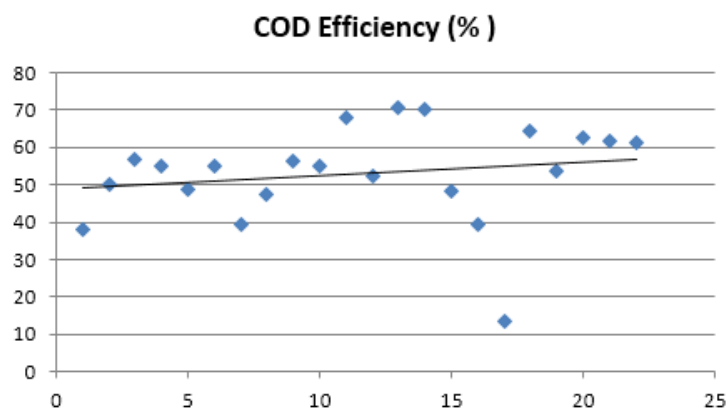
La prueba piloto se inició en modo continuo aumentando progresivamente el flujo a tratar para encontrar el punto de quiebre en la eficiencia de remoción. En la Figura 13 remoción de DQO en modo de flujo continuo) se puede observar como la eficiencia decae en el día 7, esto se debe al fenómeno de lavado de biomasa que no es más que la pérdida de microorganismos por una alta velocidad de flujo. Este valor servirá más adelante en el diseño del sistema como uno de los límites operativos.

FIGURA 13 REMOCIÓN DE DQO EN MODO DE FLUJO CONTINUO



Para prevenir la pérdida de biomasa se decidió operar el piloto por tandas (modo Batch) haciendo 3 ciclos completos por día. La prueba se desarrolló de esta forma por otros 25 días.

FIGURA 14 REMOCIÓN DE DQO EN MODO DE FLUJO POR TANDAS



En el nuevo modo de operación, la eficiencia de remoción se mantuvo estable alrededor de 60 y 70% con un episodio de baja remoción debido a un evento de lluvia fuerte lo cual ocasionó la dilución de la carga de entrada y por tanto una baja teórica en la remoción.

Este comportamiento estable de hecho prueba la viabilidad desde el punto de vista técnico para este sistema con este efluente en particular cumpliendo con los objetivos propuestos.

6. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.

La selección del tipo de tratamiento depende de las características del agua a tratar y de los objetivos de reducción que se tengan (parámetros de interés). En este caso, la selección se basa en la remoción principalmente de carga orgánica (fenoles) y nitrógeno amoniacal. El sistema de tratamiento se clasifica como “de alto rendimiento” debido a que su dimensionamiento se realiza empleando métodos de modelación de los sistemas de tratamiento por lodos activados. La aireación acelera y estabiliza el rendimiento, además, provee control sobre el proceso, lo cual no es posible con sistemas de lagunas no aireados.

Las bacterias aerobias, además de oxígeno y una fuente de carbono, requieren una proporción balanceada de nutrientes para sustentar su crecimiento y llevar a cabo la degradación de la carga orgánica. A pesar de que el agua de la facilidad contiene nitrógeno (en forma de amonio), hay deficiencia en la disponibilidad de otros elementos químicos, por esta razón, fue necesario instalar un sistema de dosificación de químicos para contar con una aplicación precisa de los nutrientes.

Para soportar el crecimiento bacteriano es necesario aplicar nutrientes suplementarios debido al origen industrial del agua a tratar, los requerimientos de nutrientes calculados por el diseñador se muestran en la tabla a continuación:

TABLA 4 REQUERIMIENTO CALCULADO DE NUTRIENTES.

<i>Elemento</i>	<i>Requerimiento</i>	<i>Unidad</i>
<i>Fósforo</i>	77	<i>Kg P/d</i>
<i>Potasio</i>	45	<i>Kg K/d</i>
<i>Calcio</i>	45	<i>kg Ca/d</i>
<i>Magnesio</i>	32	<i>Kg Mg/d</i>
<i>Azufre</i>	27	<i>Kg S/d</i>
<i>Sodio</i>	14	<i>Kg Na/d</i>
<i>Hierro</i>	9	<i>kg Fe/d</i>
<i>Zinc</i>	0.91	<i>Kg Zn/d</i>
<i>Manganeso</i>	0.45	<i>Kg Mn/d</i>
<i>Cobre</i>	0.091	<i>Kg Cu/d</i>
<i>Molibdeno</i>	0.0181	<i>Kg Mo/d</i>
<i>Cobalto</i>	0.00181	<i>Kg Co/d</i>

De acuerdo a los resultados de la prueba piloto, el proceso de aireación se debería en las lagunas 4 (4A y 4B), en las cuales se logrará la remoción de la carga orgánica anteriormente mencionada a través de una comunidad bacteriana, el crecimiento de las bacterias traerá como consecuencia un aumento en la cantidad de sólidos suspendidos (biomasa) a la salida de dichas

lagunas. Estos lodos de origen bacteriano en principio se acumularán y luego serán degradados aguas abajo.

Para controlar la cantidad de sólidos suspendidos se recomendó modificar las lagunas 5A y 5B, dividiéndolas en dos secciones iguales por medio de un baffle deflector o pantalla. La sección aguas arriba del baffle proveería condiciones para la sedimentación de los sólidos de origen bacteriano (sin aireación). Los sólidos sedimentados se acumularán en el fondo de la laguna y sufrirán una descomposición parcialmente anaerobia. La segunda zona de la laguna será aireada para mantener condiciones aerobias que promuevan la degradación de los sólidos y de igual forma inhiban la liberación de compuestos ya reducidos (p. ej. Amonio) durante el proceso de degradación.

6.1 DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS DE AIREACIÓN (4A y 4B).

Las bacterias heterótrofas aerobias degradarán rápidamente los fenoles y otros compuestos de cadena corta; el tamaño de una laguna debe ser calculado para permitir un crecimiento apropiado de las bacterias residentes y limitar la pérdida de la población bacteriana por efectos del flujo (por lavado o *washout*).

Debido a las elevadas temperaturas tanto del agua como del aire, se esperaba que el crecimiento bacteriano sea mucho más acelerado en comparación con las lagunas convencionales usadas en regiones de altas latitudes o de climas más fríos, lo cual permitió el uso de tiempos de retención relativamente menores a los usuales.

Las lagunas aireadas fueron dimensionadas para mejorar el desempeño de las existentes lagunas 4A y 4B. Para optimizar la transferencia de oxígeno, la profundidad del agua fue aumentada de 5 ft (1.5m) a una profundidad operativa efectiva de 13.1 ft (4 metros). El tiempo de retención de cada laguna es de alrededor de 0.35 días (8.4 horas) para las lagunas que fueron intervenidas (4A y 4B).

Dadas las condiciones de tiempo de retención, temperatura y condiciones del agua de entrada, es posible realizar una estimación razonable de del desempeño del proceso, basada en las tasas típicas de desarrollo bacteriano. En la (Figura 5 Metabolismo autotrofo.) Se muestra un resumen de los parámetros y valores empleados para evaluar el desempeño en remoción de DQO de las lagunas aireadas.

Los resultados del modelo de cálculo indican que una laguna aireada con 0.35 días de tiempo de retención (8.4 horas) reducirá la concentración de DQO desde 61 mg/L hasta 17.4 mg/L. A pesar de que la DQO no es uno de los parámetros objetivo para este tratamiento, constituye un indicador de tratamiento de la carga orgánica. De acuerdo al diseñador, un volumen en mezcla completa equivalente a 8.4 horas de retención se recomienda para obtener cerca de 72% de remoción de carga orgánica.

6.2 DIMENSIONAMIENTO DE LAS LAGUNAS DE SEDIMENTACIÓN Y REAIREACIÓN (5A Y 5B).

Las lagunas 5A y 5B fueron rediseñadas para operar como unidades de sedimentación y aireación secundaria. El objeto del proceso en las lagunas 5 es el de retener los sólidos que se generan en los procesos de las lagunas 4 (aireadas) y disminuir la cantidad de sólidos suspendidos que salen en el efluente, evitando a su vez, que los sólidos retenidos liberen nuevamente el amonio y el metano que se pudiera formar en ausencia de oxígeno.

La primera mitad de las lagunas 5A y 5B es la zona de sedimentación que no fue intervenida y solo fue dividida de la segunda zona por un baffle.

La segunda mitad de las lagunas, parcialmente aireada para mantener las condiciones aerobias en el lodo y minimizar la liberación de compuestos reducidos como amonio y metano como lo ilustra la figura 7 (Rich, 1999).

El nivel de oxígeno que se especificó para las lagunas 5 y que garantiza una degradación aerobia del lodo se basa en un requerimiento diario de oxígeno⁴ de 40 gramos por m² (gO₂/m²/d). El resumen de cálculo de la cantidad de lodo producido y el flujo de aire necesario para las lagunas 5A y 5B se muestra en la tabla 7.

TABLA 5 RESUMEN DE CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN CRÍTICO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA

⁴ Rich, Linvil. High performance aerated lagoon systems. American Academy of Environmental Engineers, 1999

<i>Parametro</i>	<i>Valor</i>	<i>unidad</i>
<i>Temperatura</i>	32	°C
<i>Flujo</i>	2,400	KBWPD
<i>Tiempo de retención hidráulico (HRT)</i>	0.35	d
<i>Yield</i>	0.33	gVSS/gDQO
<i>DQO in</i>	61.11	mg/L
<i>K_s</i>	20	mg/L
<i>b_H</i>	1.33	d ⁻¹
<i>MLSS</i>	13.8	mg/L
<i>μ_{max}</i>	9	d ⁻¹
<i>μ_T</i>	12.25	d ⁻¹
<i>DQO out</i>	17.4	mg/L
<i>Biomasa producida</i>	5,247	KgVSS/d
<i>HRT_c</i>	0.18	d
<i>f_{vi}</i>	0.2	mgISS/mgDQO
<i>ISS</i>	2.75	mgISS/L
<i>Tasa de acumulación</i>	0.11	m/año

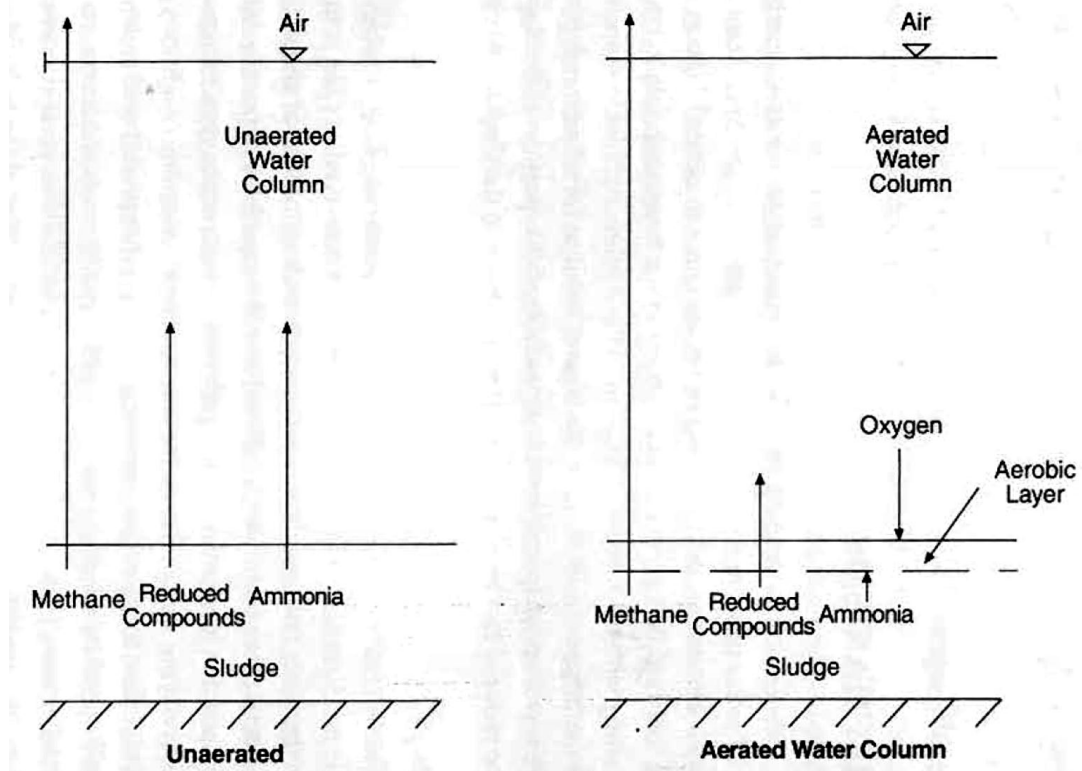
TABLA 6 RESUMEN DE CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AIRE⁵ PARA LAS LAGUNAS 5A Y 5B

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Tasa de degradación Aerobia</i>	40	g O ₂ /m ² /d
<i>Flujo de Aire unitario</i>	0.005	CFM/ft ² @ 7.5%
<i>Área de fondo efectiva</i>	430,556	ft ²
<i>Flujo de Aire</i>	2,159	SCFM

Adicionalmente, la tasa de aireación tiene en cuenta el coeficiente de transferencia de oxígeno para las membranas a la profundidad promedio de la laguna de 5 ft (1.5m) y la tasa de transferencia de oxígeno en condiciones estándar a esta profundidad.

⁵ Rich, Linvil. High performance aerated lagoon systems. American Academy of Environmental Engineers, 1999

FIGURA 15 DEGRADACIÓN DEL LODO EN EL FONDO DE LA LAGUNA EN CONDICIONES NO AIREADAS (IZQ.) Y AIREADAS (DER.⁶)



De acuerdo con el diseño, la acumulación de lodos esperada para las lagunas 5A y 5B es de 0.11m/año, la tasa de estabilización para los lodos se estima en alrededor de 300g de sólidos/m²/día (Rich, 1999). Tomando una entrada de sólidos (lodos) de 5247 Kg /día, se requiere un área de 17490 m² (1.75Ha). Teniendo un área combinada entre las lagunas 5A y 5B de 7.89Ha se concluye que es suficiente para lograr una estabilización de fondo de los lodos acumulados con la velocidad de acumulación ya mencionada.

6.3 REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO (AIRE).

De acuerdo a los cálculos realizados por las firmas de ingeniería contratadas para el proyecto, el requerimiento de oxígeno del sistema es de 26,530 pies cúbicos por minuto en condiciones estándar (SCFM), los factores y resumen de cálculo de muestran en la tabla 6.

⁶ Rich, Linvil. High performance aerated lagoon systems. American Academy of Environmental Engineers, 1999

TABLA 7 REQUERIMIENTOS DE AIRE Y FACTORES DE CÁLCULO PARA EL SISTEMA

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Flujo</i>	2,400	<i>KBWPD</i>
<i>DBO in</i>	45.9	<i>mg/L</i>
<i>DBO out</i>	13.1	<i>mg/L</i>
<i>TKN in</i>	4.6	<i>mg/L</i>
<i>TKN out</i>	0.8	<i>mg/L</i>
<i>Elevación</i>	140	<i>msnm</i>
<i>P atm</i>	14.5	<i>psia</i>
<i>Temperatura</i>	32	<i>°C</i>
<i>Alfa</i>	0.7	
<i>Beta</i>	0.9	
<i>Theta</i>	1.024	
<i>O₂/DBO</i>	1.5	
<i>O₂/N</i>	4.6	
<i>C_{s,20}</i>	9	<i>mg/L</i>
<i>C_{s,T}</i>	7.2	<i>mg/L</i>
<i>C_w</i>	2	<i>mg/L</i>
<i>OTR, DBO</i>	42,661	<i>lb O₂/d</i>
<i>OTR, N</i>	15,161	<i>lb O₂/d</i>
<i>OTR, Total</i>	2,409	<i>lb O₂/h</i>
<i>SOTR CF</i>	0.46	
<i>SOTR</i>	5,263	<i>lb O₂/h</i>
<i>SOTE</i>	21	<i>%</i>
<i>Flujo Aire</i>	26,530	<i>SCFM</i>

La inusual gran cantidad de agua a tratar (2'400.000 BWPD) y la temperatura media del agua hacen que se requiera un gran volumen de aire a aplicar para lograr la degradación por parte de las bacterias de la carga de DBO y de fenoles principalmente.

La eficiencia en la transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa a la fase líquida aumenta de forma lineal con la profundidad. Dado que el proceso es intensivo en consumo de energía, se decidió profundizar las lagunas 4A y 4B para maximizar dicha transferencia y reducir los costos operativos. La profundidad antes del proyecto era de 5 ft (1.5 m), muy baja para una transferencia eficiente de oxígeno empleando difusores sumergidos.

Para optimizar la eficiencia en la transferencia y reducir los costos asociados de operación, se recomendó una profundidad efectiva de 13.12ft (4m). Para ello se debieron realizar excavaciones y adecuación del terreno en las lagunas existentes y profundizarlas para asegurar esta profundidad efectiva a la altura de los difusores. Se realizaron estudios geotécnicos e hidrogeológicos para evaluar la viabilidad económica de la realización dichas obras.

7. MODELACIÓN DE FLUJO DE LAS LAGUNAS.

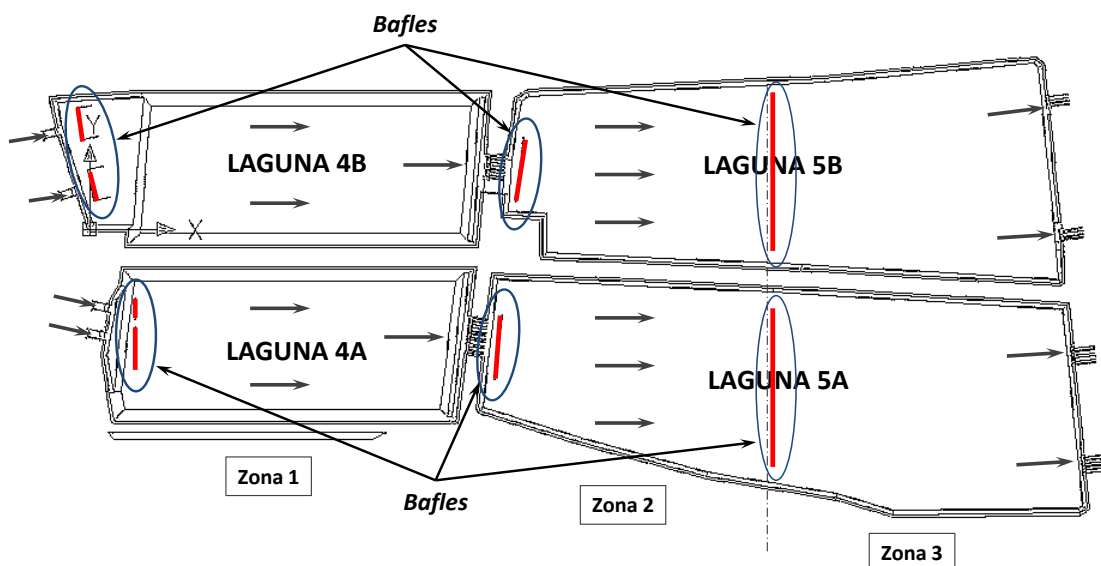
Las lagunas presentaban patrones de flujo desuniformes antes de la intervención, por esa razón fue necesario llevar a cabo un proceso de simulación empleando un modelo CFD (*computational fluid dynamics*).

Un modelo, como cualquier sistema de procesamiento de información, depende en gran medida de la calidad de los datos de entrada y por ende la importancia de la parametrización de las variables que en este caso son la geometría y batimetría de las lagunas, las variaciones de flujo, los perfiles de velocidad y la ubicación de los puntos de entrada y salida.

La (Figura 16 Vista esquemática general de las lagunas 4A, 4B, 5A y 5B.) muestra una vista esquemática superior de las lagunas 4A, 4B, 5A y 5B. En ella se muestra de forma ilustrativa:

- La identificación de las zonas donde ocurren los procesos de aireación primaria (Zona 1), sedimentación (Zona 2) y aireación secundaria (Zona 3).
- La dirección de los flujos desde la entrada del proceso (extremo izquierdo) hasta la salida (extremo derecho).
- La localización de los baffles al inicio de todas las lagunas, y en el punto medio de las lagunas 5A y 5B.

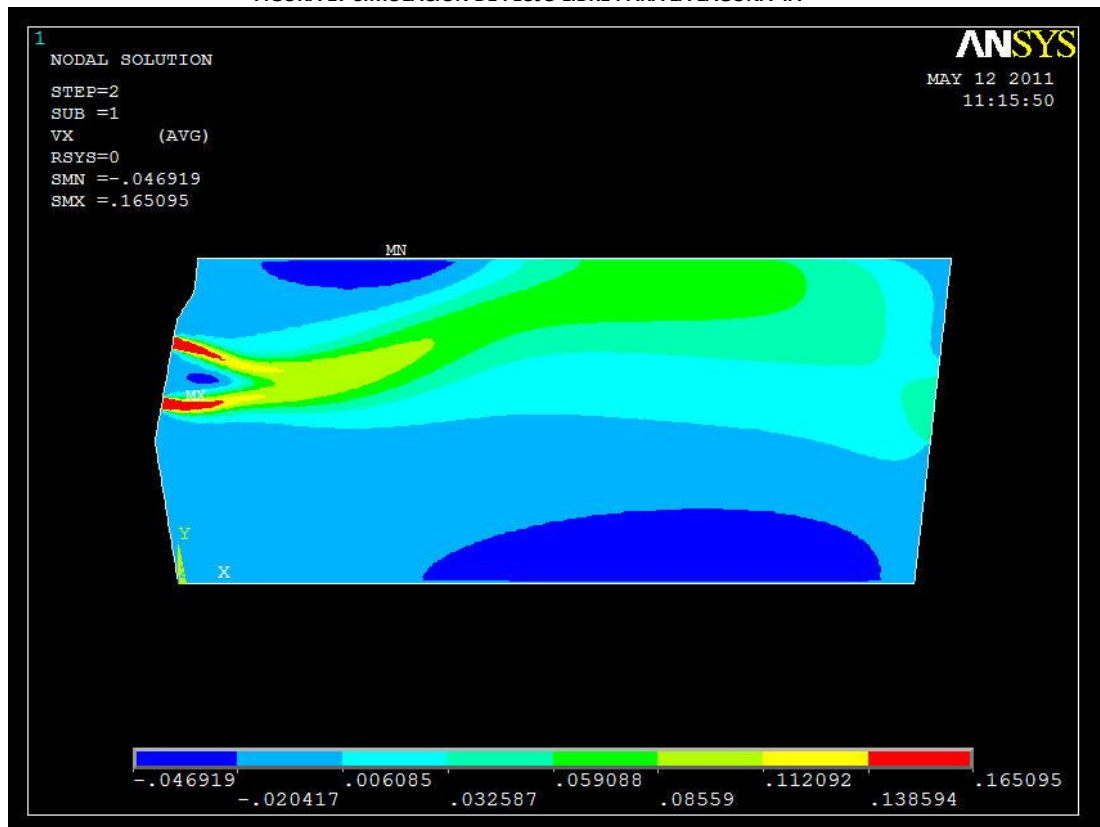
FIGURA 16 VISTA ESQUEMÁTICA GENERAL DE LAS LAGUNAS 4A, 4B, 5A Y 5B.



La metodología de análisis inicia con el estudio del comportamiento del flujo de entrada a las lagunas sin incluir algún tipo de obstáculo (flujo libre sin baffles). Con ésta información se realiza un primer diagnóstico de la situación problema y luego se procede a realizar la primera iteración donde se sitúan unos *baffles de control*. Estos baffles preliminares, para la primera iteración, tienen una geometría que se ajusta a las dimensiones internas de las lagunas. Luego de la primera

iteración se evalúa el comportamiento del flujo en cada laguna, verificando la presencia de cortos circuitos. En las siguientes iteraciones, se modifican progresivamente los parámetros geométricos y la localización de los baffles respecto de los flujos de entrada hasta que se obtenga, en la extensión de cada laguna, la velocidad de diseño para el flujo en las lagunas. Esta velocidad de diseño es de 0.015 m/s (1.5 cm/s).

FIGURA 17 SIMULACIÓN DE FLUJO LIBRE PARA LA LAGUNA 4A



La simulación en flujo libre de la laguna 4A (Figura 17 Simulación de flujo libre para la laguna 4A) muestra que aproximadamente el 35% del volumen de agua de la laguna presenta cortos circuitos en el flujo y cerca del 55% del volumen se mueve en reversa. Esto significa que es difícil que el proceso de aireación primaria de la laguna 4A ocurra adecuadamente.

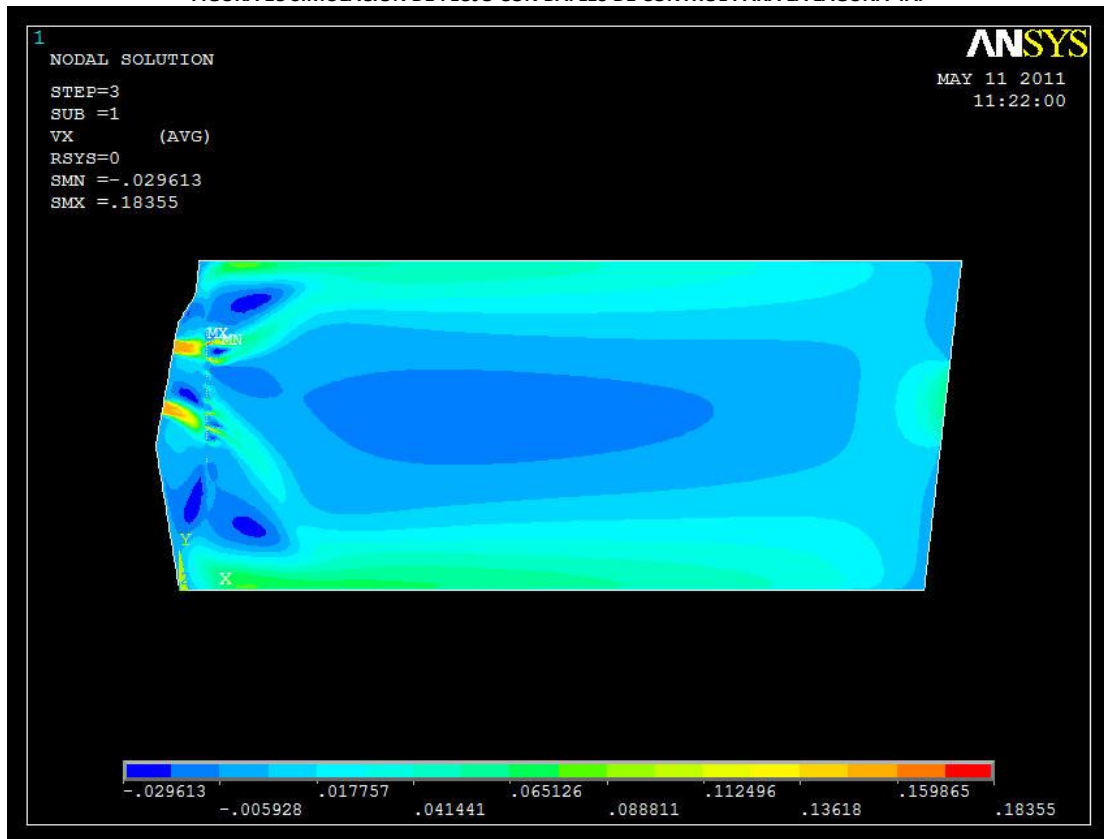
- **Simulación con baffles de control**

La primera simulación para la laguna 4A (Figura 18 Simulación de flujo con baffles de control para la laguna 4A.) incluye dos baffles de control de 20 metros de longitud total y 4.2 metros de altura total, con ventanas distribuidas simétricamente. La ubicación de los baffles se hace a 20 metros respecto de los puntos de entrada del agua.

Los resultados de la simulación confirman la funcionalidad de los baffles para mejorar la distribución de los flujos en la laguna. Se observa que el flujo del

agua se direcciona hacia los costados, pero una gran mayoría de éste va en reversa (principalmente en la región central de la laguna). Esto ocurre porque los baffles inducen vórtices de Karman cuando el flujo se desprende de los extremos y generan zonas de baja presión en esos puntos.

FIGURA 18 SIMULACIÓN DE FLUJO CON BAFLES DE CONTROL PARA LA LAGUNA 4A.



- **Simulación con configuración óptima**

Después de realizar varias simulaciones variando progresivamente la distancia respecto de los puntos de entrada del agua y la separación entre baffles, se encuentra una condición de flujo para casi toda la laguna en la que se alcanza una distribución de velocidades que alcanza valores muy cercanos a la velocidad de diseño para el flujo en las lagunas.

La Figura 19 Simulación de flujo con configuración óptima de baffles.) Muestra los resultados de la simulación que cumple con la condición de flujo descrita anteriormente. Aproximadamente el 65% del volumen efectivo de la laguna se mueve a la velocidad de diseño. El flujo en reversa es de 22% aproximadamente. El flujo en reversa se presenta en las regiones donde ocurre el desprendimiento del flujo de los baffles.

Nótese que el corto circuito de la región central de la Figura 17 Simulación de flujo libre para la laguna 4A) desaparece casi en su totalidad, y solamente se concentra en las esquinas de la laguna y en la región encerrada entre los

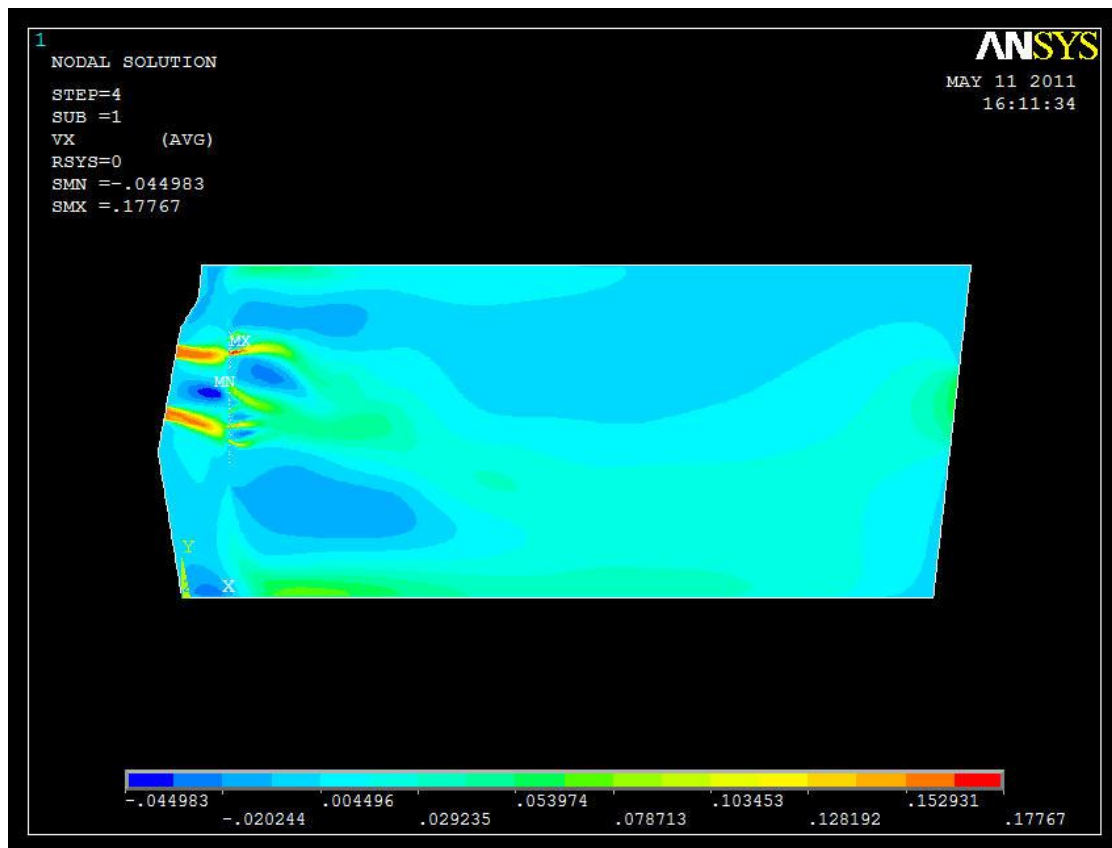
bafles y las entradas del flujo del agua. Este resultado no compromete el desempeño del proceso de aireación de la laguna.

Las dimensiones de los bafles que generan la distribución de flujo óptima para la laguna 4A se presentan en la Tabla 8 Geometría de bafles para la Laguna 4A.)

TABLA 8 GEOMETRÍA DE BAFLES PARA LA LAGUNA 4A.

Geometría de bafles para la Laguna 4A			
Longitud total (L)	[m]	15	35
Altura total (H)	[m]	4.2	4.2

FIGURA 19 SIMULACIÓN DE FLUJO CON CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE BAFLES.



7.1 Resultados de la modelación

Los resultados de las simulaciones computacionales obtenidos para las lagunas con la configuración geométrica de los bafles se resumen en la Tabla 9 Tabla resumen con los resultados de las simulaciones computacionales del flujo en las lagunas 4A, 4B, 5A y 5B.). Con la configuración propuesta, para una velocidad de diseño para el flujo en las lagunas de 0.015 m/s, con una desviación mínima respecto de este valor, se logra optimizar el flujo en el sistema de lagunas,

contribuyendo a una mejora en el rendimiento de los procesos de tratamiento del agua de producción.

TABLA 9 TABLA RESUMEN CON LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES COMPUTACIONALES DEL FLUJO EN LAS LAGUNAS 4A, 4B, 5A Y 5B.

		Dimensiones recomendadas para los baffles derivadas del análisis CFD							
		Laguna 4A		Laguna 4B		Laguna 5A		Laguna 5B	
		Baffle 1	Baffle 2	Baffle 1	Baffle 2	Entrada	Pto. Medio	Entrada	Pto. Medio
Longitud total (L)	[m]	15	25	20	20	40	120	40	115
Altura total (H)	[m]	4,2	4,2	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5	0,5
Velocidad de diseño para el flujo en las lagunas									0.015 m/s

7.2 Configuración del sistema

Sobre la berma (cresta del talud) entre las lagunas se instalaron equipos sopladores para suministrar aire a los múltiples de distribución y de estos a su vez a los ramales laterales, que a través de los *drop lines* (tuberías bajantes) alimentaran los *clusters* con difusores de membrana de burbuja fina sumergidos en la laguna. (Ver Figura 20 esquema de descarga de aire desde el soplador hacia el tenedor (multiple de distribución) con unión bridada para conexión de ramales.)

Los difusores fueron distribuidos de manera uniforme sobre el fondo de la laguna para lograr una aplicación homogénea del aire. Se recomendó emplear una configuración de cuatro difusores por *cluster* en las lagunas 4 y dos difusores por *cluster* en las lagunas 5. La distribución típica se muestra en la Figura 21 Esquema de las líneas sumergidas (bajantes o droplines) de distribución de aire).

FIGURA 20 ESQUEMA DE DESCARGA DE AIRE DESDE EL SOPLADOR HACIA EL TENEDOR (MULTIPLE DE DISTRIBUCIÓN) CON UNIÓN BRIDADA PARA CONEXIÓN DE RAMALES.

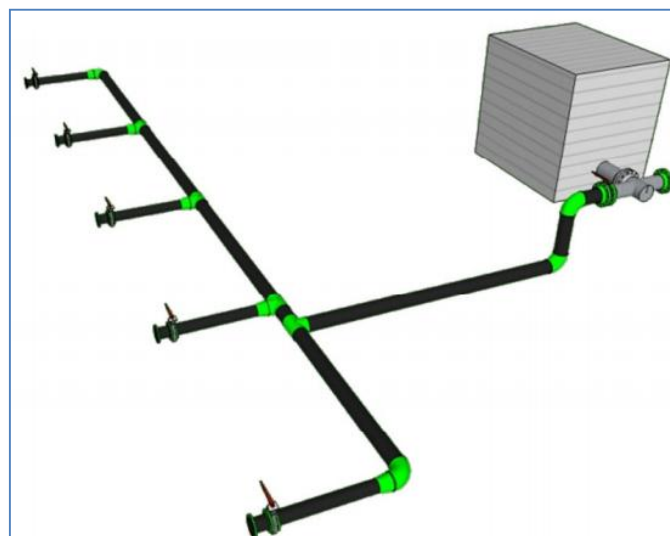
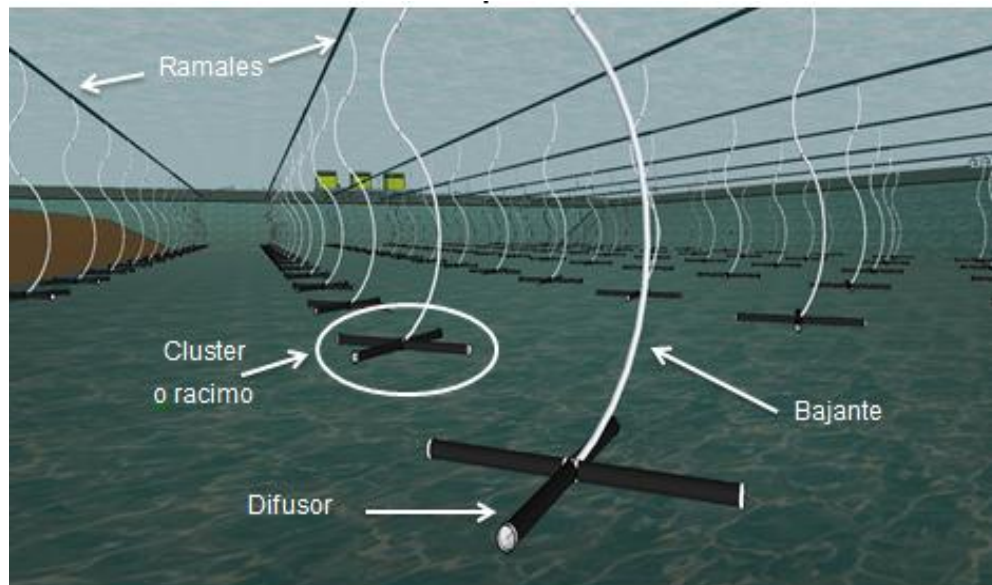


FIGURA 21 ESQUEMA DE LAS LINEAS SUMERGIDAS (BAJANTES O DROPLINES) DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE



7.3 Ductos principales, múltiples y ramales.

Materiales. La selección de materiales para el sistema debió tener en cuenta la presión, la temperatura, las condiciones de corrosión de las tuberías y el que se facilite el mantenimiento del sistema. Se determinó que las tuberías de salida de los soplores (cabezales) fueran metálicas y se cambiara a tubería plástica (Polipropileno). Para los múltiples de distribución (tenedores) y los ramales. Las bajantes (*drop lines*) de los *clusters* con difusores son flexibles para facilitar su manejo y mantenimiento. Los *clusters* van suspendidos de la tubería plástica y tienen un lastre en la parte inferior que compensa la fuerza de flotación. Este lastre fue prefabricado en concreto.

Uniformidad de distribución de flujo. La selección de diámetros de los ductos principales que salen de los soplores, los múltiples de distribución, los ramales, bajantes (*drop lines*), *clusters* y difusores se diseñaron para asegurar una uniformidad espacial en la distribución del aire en las lagunas con un margen de $\pm 5\%$ del caudal medio en cada punto de la red. Este modelo de flujo, con el cual se calcularon las pérdidas en cada tramo y accesorio se corrió teniendo en cuenta las curvas de caudal –presión de los difusores que se emplearon en el diseño. La velocidad del aire para el diseño de las tuberías de distribución debió ser mantenida en un rango de entre 1800 a 3000 pies por minuto (ft/min).

Laguna 4 Para distribuir los 26,000 SCFM en el fondo de las lagunas, se especificó en el diseño una red con 80 ramales (distribuidores laterales) con 12 *clusters* de cuatro difusores cada uno, para un total de 960 *clusters* y 3,840 difusores. El caudal promedio por difusor es de 7 SCFM y por *cluster* de 28 SCFM. La separación promedio entre *clusters* para la laguna 4 es de 6 x 6 m. operando con difusores de burbuja fina a una profundidad de 13.12 ft (4m)

Laguna 5. Para distribuir los 2,000 SCFM en el fondo de las lagunas 5, se especifico en el diseño un total de 20 ramales (distribuidores laterales) con 20 *clusters* cada uno y con dos difusores por *cluster*, para un total de 800 difusores. El caudal promedio por difusor es de 2.75 SCFM y por *cluster* de 5.5 SCFM operando con difusores de burbuja fina a una profundidad de 5 ft (1.5 m)

Temperatura. Los ductos y tuberías debían soportar la temperatura del aire comprimido que se estima de acuerdo al modelo de transferencia de calor, en cada uno de los tramos del sistema de distribución. Las temperaturas de operación máximas calculadas para los sopladores en el punto de operación son de 172°F (78°C) para las lagunas 4 y de 124°F (51°C) para las lagunas 5

Sopladores. Se seleccionaron sopladores trilobulares, que generan una corriente de aire libre de aceite y que se pudieran prender y apagar en forma escalonada para controlar el proceso.

Lagunas 4. De acuerdo al cálculo de requerimiento de aire, en las lagunas 4A y 4B se requiere un flujo total de 26,530 SCFM. Para lograr una distribución uniforme y poder controlar el proceso en forma escalonada, se recomendó instalar ocho sopladores de 3,316 SCFM c/u.

Lagunas 5. De acuerdo al cálculo de requerimiento de aire, para estabilizar los lodos de las lagunas 5, se requiere un flujo de 2,159 SCFM para mantener las condiciones aerobias en esa zona. Se decidió emplear una configuración de racimos o clúster de dos difusores separados uniformemente y enfrentados a la dirección del flujo para lograr un efecto de cortina de aire. Se decidió tener un soplador de suplencia para la segunda laguna que también puede servir para reforzar el proceso para un total de dos unidades.

Difusores. Los difusores sumergidos tienen una rutina de reemplazo cada 5 a 10 años según las recomendaciones del fabricante, la vida útil observada en el campo que dependerá de la cantidad de sólidos suspendidos y de aceites y grasa en el agua que pueden acumularse en la superficie del difusor. Por esta razón fue importante que las líneas y los difusores pudieran ser sacados de operación para mantenimiento, y alternativamente, que los clusters con difusores pudieran ser traídos a la superficie para ser reparados desde un bote. Las membranas de los difusores son resistentes al aceite que se encuentra en las lagunas que presenta una concentración del orden de 2 a 3 mg/L como aceite en agua.

Laguna 4. La eficiencia de transferencia de oxígeno en condiciones estándar (SOTE en inglés) de los difusores asumida para el diseño a la profundidad de 13.12 ft (4m), fue de 21%. Los difusores seleccionados tienen una eficiencia de transferencia SOTE igual o mayor a 1.6% por pie de sumergencia (5.25% por m de sumergencia), es decir 21% para 4 metros de profundidad. Cada difusor entrega 7 SCFM (*Standard Cubic Feet per Minute*) y cada conjunto (*cluster*) entrega 28 SCFM de aire de acuerdo al diseño.

Laguna 5. La eficiencia de transferencia de oxígeno en condiciones estándar (SOTE en inglés) de los difusores asumida para diseño a la profundidad de 4.9 ft (1.5 m) es de 7.8%. Los difusores seleccionados tienen una eficiencia de transferencia SOTE igual o mayor a 1.6% por pie de sumergencia (5.25% por m de sumergencia). Los difusores de burbuja fina están adosados a los *clusters*. Cada difusor entrega 2.75SCFM (*Standard Cubic Feet per Minute*) y cada conjunto (clúster) entrega 5.5 SCFM de aire.

8. EJECUCION

8.1 OBRA CIVIL

Teniendo en cuenta la nueva profundidad requerida para las Lagunas 4A/B de acuerdo al diseño basado en los resultados del ensayo piloto, un plan de excavaciones y adecuación de terreno fue implementado en la facilidad. Dado que la producción del campo no podía ser suspendida durante las labores, se realizo la tarea "en caliente" para lo cual se tuvo que desviar la totalidad del flujo principal que viene de la laguna 4 (antes que se separe en 4A y 4B, ver Figura 23 DETALLE DE LAGUNA 4A DURANTE ACTIVIDADES DE ADECUACIÓN DE TERRENO.) hacia uno de los trenes (4B inicialmente y posteriormente 4A). Las labores de excavación requirieron cerca de 60 días durante los cuales se removieron cerca de 100.000 m³ de material para llevar el fondo de las lagunas desde la cota -1.5 hasta la -4.2 (Datum nivel de descarga).

FIGURA 22 VISTA AÉREA DE LA FACILIDAD. SE OBSERVA EN EL MEDIO DE LA IMAGEN LA LAGUNA 4A SIN FLUJO DURANTE LA INTERVENCIÓN DE ADECUACIÓN DE TERRENO.



Una vez alcanzada la profundidad requerida, se procedió a aplicar una capa de arcilla (abundante en la región) de 1 metro de espesor en las caras internas de las lagunas para impermeabilizarlas y prevenir ex-filtraciones de agua de producción hacia el entorno.

Durante esta etapa se fundieron anclajes que servirían más adelante para fijar los baffles deflectores de flujo en las cabezas de laguna.

FIGURA 23 DETALLE DE LAGUNA 4A DURANTE ACTIVIDADES DE ADECUACIÓN DE TERRENO.



8.1.1 Adecuación de taludes.

Las bermas centrales de las lagunas fueron ampliadas para permitir el tránsito de maquinaria pesada y el ingreso de los equipos necesarios tanto para la construcción como para la operación del sistema. En la Figura 24 Bermas en proceso de instalación de tuberías. Se observa una mini excavadora perfilando el talud luego de haber instalado las líneas principales de aire.

FIGURA 24 BERMAS EN PROCESO DE INSTALACIÓN DE TUBERÍAS.



FIGURA 25 DETALLE DE TALUD PERFILADO CON RAMALES FLOTANTES SOBRE LA LAGUNA 4B.



8.1.2 Construcción de dos nuevas plataformas (CCM & CHEMDOSE).

Dos plataformas fueron necesarias para alojar dos de los sistemas principales:

- Sub estación eléctrica para suministro de potencia y centro de control de motores (CCM) ubicada en la berma de intersección entre lagunas 4B-5B
- Patín de dosificación de nutrientes/bacterias (CHEMDOSE) ubicada en la cabeza de laguna 4B.

FIGURA 26 LOCALIZACIÓN DE LAS NUEVAS PLATAFORMAS.

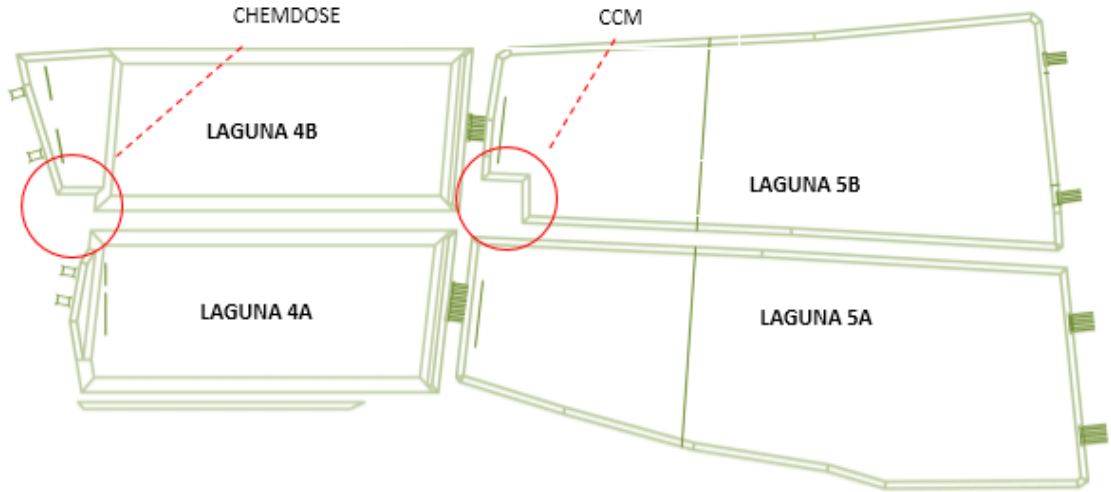


FIGURA 27 VISTA INICIAL PLATAFORMA ADICIONAL PARA PATÍN DE NUTRIENTES (CHEMDOSE). LAGUNA 4B.



FIGURA 28 VISTA FINAL PLATAFORMA ADICIONAL PARA PATÍN DE NUTRIENTES (CHEMDOSE). LAGUNA 4B.



8.2 OBRA ELECTRICA

8.2.1 Bancos de ductos

Una red completa de banco de ductos fue diseñada e instalada d forma simultánea con las demás obras para suministrar los requerimientos de potencia del sistema. Asimismo, una sub estación eléctrica con tres transformadores de media a baja tensión (de 13.500 a 480 VAC) de 700 kVA cada uno.

FIGURA 29 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LOS BANCOS DE DUCTOS, LAGUNA 5B.



En la Figura 30 Banco principal a lo largo de la berma entre lagunas 5A y 5B.) se observa en el costado derecho ramales de distribución de aire flotando hacia su posición final a la salida de las lagunas 5.

FIGURA 30 BANCO PRINCIPAL A LO LARGO DE LA BERMA ENTRE LAGUNAS 5A Y 5B.



Debido al alto nivel freático en el área fue necesario aumentar la carga de anclaje para mantener en su posición los *conduits* que en este caso fueron plásticos. Para lograrlo se disminuyó la distancia entre puntos de amarre y se emplearon bloques prefabricados de concreto para agilizar la tarea.

8.2.2 Centro de control de motores

Para el suministro de potencia del sistema fue necesario instalar una subestación eléctrica y un centro de control de motores con los arrancadores suaves de los

sopladores y el enlace de control con el tablero central para monitoreo de señales operativas.

FIGURE 32 CENTRO DE CONTROL DE MOTORES CCM.



8.3 COMUNICACIÓN Y CONTROL.

Las señales de estado de motores, sondas analíticas y niveles, así como los comandos encendido y apagado se monitorean y manipulan desde el CCM en Laguna 5B.

El sistema se monitorea y controla desde un PLC central ubicado en el tablero principal del patín de nutrientes (CHEMDOSE). El controlador PLC tiene las siguientes características:

TABLA 10 CONTROLADOR SISTEMA DE AIREACIÓN.

CONTROLADOR SISTEMA DE AIREACIÓN			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MARCA	NUMERO DE PARTE
PLC COMPACT LOGIX	1	ALLEN BRADLEY	1769-L23E-QBFC1B
MODULO COMPACT 16 ENTRADAS DIGITALES	2	ALLEN BRADLEY	1769-IQ16

8.3.1 Instrumentos y señales

Los instrumentos de medición transmiten la información a través de una señal de 4 a 20 mA la cual debe ser parametrizada en el PLC de acuerdo a los siguientes rangos y unidades

TABLA 11 UNIDADES Y RANGOS DE INSTRUMENTACIÓN.

UNIDADES Y RANGOS DE INSTRUMENTACIÓN			
INSTRUMENTO	TAG	RANGO	UNIDADES
TRANSMISOR DE PH LAGUNA 5A	AIT-0001	0 - 14	pH
TRANSMISOR DE OXIGENO LAGUNA 5A	AIT-0002	0 - 20	ppm
TRANSMISOR DE PH LAGUNA 5B	AIT-0003	0 - 14	pH
TRANSMISOR DE OXIGENO LAGUNA 5B	AIT-0004	0 - 20	ppm
TRANSMISOR DE FOSFATOS LAGUNA 5A	AIT-0005	0 - 15	ppm
TRANSMISOR DE FOSFATOS LAGUNA 5B	AIT-0006	0 - 15	ppm

Ver ANEXO 1. Lista completa de señales del sistema.

8.3.2 Fibra óptica

EL controlador principal se comunica con la sala de control de la facilidad vía fibra óptica para poder operar de forma remota y tener un tiempo de respuesta menor en caso de parada de emergencia o falla de alguno de los equipos.

8.3.3 Obra mecánica

Líneas de aire.

Con el fin de facilitar el montaje y posterior acceso a las líneas de aire se seleccionó el Polipropileno (PP) como el material más indicado. Las juntas entre tubos se realizaron con el método de termofusión empleando para ello equipo y personal especializado.

En total se emplearon cerca de 8400 metros de tubería para los ramales flotantes, teniendo en cuenta que la longitud estándar de estos tubos es de 12 metros, fueron necesarias cerca de 700 juntas tan solo para este ítem de la obra.

FIGURA 31 VISTA GENERAL DE RAMALES Y SOPLADORES INSTALADOS.



La longitud de los ramales es de 80 metros, en cada uno se instalaron 12 silletas a las cuales se acoplaron posteriormente las bajantes (*droplines*) flexibles que llevan el aire hasta los difusores en el fondo de la laguna.

El método de instalación tuvo que ser creado desde cero para este proyecto ya que no se conocían experiencias similares. Una vez terminados, los ramales serían lanzados al agua y remolcados con botes hasta su posición final. Se llevó a cabo una prueba de hermeticidad a cada uno de los ramales para garantizar la calidad de las juntas y prevenir el hundimiento de la línea. (Ver fotos a continuación).

FIGURA 32 ESTACIÓN DE ARMADO DE RAMALES LAGUNA 4A.



FIGURA 33 EQUIPO DE TERMOFUSIÓN EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN DE RAMALES Y TENEDORES.



En total se emplearon 8 equipos de termo fusión, para lo cual fue necesario capacitar personal en el manejo y medidas de seguridad necesarias. Los equipos fueron divididos en tres estaciones de trabajo trabajando de forma simultánea durante 60 días.

FIGURA 34 RAMALES EN EL AGUA LUEGO DE LA PRUEBA DE HERMETICIDAD LISTOS PARA SER REMOLCADOS.



De manera simultánea se fabricaron los racimos (*clusters*) con los difusores de membrana para ser instalados una vez los ramales se encontraran en su posición.

FIGURA 35 RACIMOS (CLUSTERS) ENSAMBLADOS PREVIA INSTALACIÓN.



FIGURA 36 POSICIONAMIENTO DE RAMALES E INSTALACIÓN DE BAJANTES (DROPLINES).



En la Figura 36 Posicionamiento De Ramales E Instalación De Bajantes (Droplines). Se observa un operario cargando racimos de membranas en un bote. En el fondo se observan otros tres de los seis botes que fueron necesarios para la maniobra.

De forma simultánea los botes instalaron líneas bajantes y remolcaron los ramales hasta su posición final en donde fueron anclados usando un cable de acero. Ver Figura 37 Ramales en posición anclados con cables de acero.).

FIGURA 37 RAMALES EN POSICIÓN ANCLADOS CON CABLES DE ACERO.



Los tenedores (o múltiples de distribución) representaron la mayor dificultad de ensamble debido a su geometría y su dificultad de manejo. En la secuencia de fotos a continuación se observa el proceso de fabricación simplificado.

FIGURA 38 SE OBSERVAN LAS DOS MITADES DE UN TENEDOR LISTO PARA SER ENSAMBLADO.



FIGURA 40 PROCESO DE ENSAMBLE DE LAS DOS MITADES DE UN TENEDOR.



FIGURA 39 TENEDOR TERMINADO LISTO PARA SE POSICIONADO.



FIGURA 40 DETALLE DE ACOPLER PARA DISTRIBUCIÓN DE AIRE Y CAMBIO DE MATERIAL (DE ACERO A POLIPROPILENO).



En la Figura 40 Detalle de acople para distribución de aire y cambio de material (de acero a polipropileno). se observa la conexión de salida en acero y el cambio de material a polipropileno en dirección a las lagunas.

FIGURA 41 VISTA FINAL DEL CONJUNTO SOPLADOR-TENEDOR (ENTERRADO)-RAMALES FLOTANTES.



8.4 INSTALACION DE SOPLADORES.

Los sopladores se montaron sobre una placa base de concreto y se procedió al armado de las cabinas de insonorización que además protegen el equipo de las condiciones ambientales.

Para detalles técnicos del equipo soplador ver Anexos 2 y 3, Hoja de datos sopladores.

FIGURA 42 DETALLE DE SOPLADORES ANTES DE LA INSTALACIÓN DE CABINAS DE INSONORIZACIÓN.



FIGURA 43 CABINA DE INSONORIZACIÓN EN PROCESO DE ARMADO.



FIGURA 44 SOPLADORES CON CABINA DE INSONORIZACIÓN TERMINADA.



8.5 PATIN DE DOSIFICACION DE NUTRIENTES-BACTERIAS.

Para cubrir la demanda de nutrientes y adicionar bacterias al proceso de tratamiento se construyó un área dedicada a esta función con los siguientes componentes:

- Caseta de almacenamiento de insumos: con un área útil de 90 m², cuenta con cubierta en material termo acústico y cerramiento lateral desmontable en plástico tipo carpa.
- Foso de derrames y Tanques de almacenamiento: Dos tanques con capacidad de 10m³ cada uno, fabricados en PRFV y refuerzos en acero. cuentan con uniones bridadas para conexión a servicio y llenado con agua cruda. El foso en el que se ubican tiene capacidad para retener 1.5 veces el volumen total de los dos tanques y cuenta con un foso de achique con bombas para evacuar el fluido derramado hacia la laguna (en caso de lluvia) o hacia un vehículo para ser transportado (en caso de derrame).
- Bombas de llenado de tanques: dos unidades sumergibles dentro de la laguna 4B para suministrar agua cruda a los tanques durante la preparación de la solución a ser aplicada.
- Puente grúa: cuenta con un polipasto de 1 TON de capacidad para izar los sacos con el producto a aplicar. el polipasto está montado sobre rieles para desplazarse a cualquiera de los dos tanques.

- Patín de dosificación: cuenta con 3 bombas dosificadoras de diafragma (2+1 en stand by), 3 sopladores para mezclar el producto dentro del tanque (2+1 en stand by), filtros de anillas para retención de sólidos en la succión de las bombas, cilindros de calibración para medición de flujo aplicado.
- Tablero central de control: Cuenta con un PLC que controla y monitorea todas las señales del sistema de tratamiento, desde allí se pueden operar todos los equipos excepto los sopladores de lagunas (controlados desde el CCM).

FIGURA 45 PATÍN DE DOSIFICACIÓN DE NUTRIENTES-BACTERIAS.



- Sopladores para mezcla de producto
- Bombas dosificadoras
- Tablero de control
- Puente grúa
- Figura 46 Área de nutrientes en proceso de construcción.



8.6 BAFLES DEFLECTORES DE FLUJO.

Para mejorar la distribución del flujo en las lagunas se instalaron baffles o pantallas deflectoras (fabricados en PVC con refuerzos en aluminio) de acuerdo a los resultados de la simulación mencionada en una sección anterior. Los baffles se ubicaron en su posición exacta usando localización GPS con un margen de error de ± 0.3 m como se describió en la sección de simulación de flujo de lagunas.

FIGURA 47 OPERARIO PREPARANDO UNO DE LOS BAFLES PARA SER DESPLEGADO EN LA LAGUNA.



De acuerdo a la simulación de flujo, los baffles no debían ser barreras "solidas" sino que debían tener áreas de paso (agujeros) para permitir que una parte del flujo pasara a través de ellos y otra fuera redistribuida para minimizar las áreas muertas de las lagunas.

FIGURA 50 DETALLE DE ANCLAJE PARA PANTALLA DEFLECTORA. AL FONDO EN LA IMAGEN SE OBSERVA EL BAFLE EN POSICIÓN.



Las pantallas deflectoras se fijaron a su posición empleando el mismo método que se usó para los ramales, anclajes de acero embebidos en concreto con cable de acero.

9. PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DEL SISTEMA

Luego de la fase de pre comisionamiento, se procedió a poner en marcha el sistema aplicando 26.000 pies cúbicos por minuto de aire (SCFM) a un flujo de agua promedio de 2'400.000 BWPD (4.4m³/s).

Además de los análisis de agua de rutina (realizados antes de este proyecto), se estableció un monitoreo independiente con mayor frecuencia llevado a cabo por un equipo de trabajo dedicado exclusivamente a este nuevo sistema de tratamiento.

Fue necesario adquirir equipos portables de análisis adicionales y dar entrenamiento a los técnicos que serían los futuros operadores del sistema de aireación.

El personal dedicado a estas tareas incluyó:

- Dos operadores en entrenamiento (Mecánico IV)
- Un ingeniero HQSE (HES).
- Un ingeniero de proceso a cargo de la operación y entrenamiento.

9.1 Rutinas de operación y mantenimiento

Las labores diarias de operación y mantenimiento incluyen:

- Limpieza manual de las sondas analíticas de pH, Oxígeno disuelto y fosfatos
- Revisión de calibración y ajuste de caudal de dosificación de nutrientes/bacterias
- Limpieza manual de boquillas y líneas de aspersion de nutrientes/bacterias
- Revisión de estado de sopladores (nivel de aceite, temperatura y presión de descarga)
- Revisión de líneas de aireación (búsqueda de fugas de aire desde bote)
- Medición de flujo de entrada al sistema y ajuste de la dosis de nutrientes/bacterias.
- Toma y análisis de muestras de calidad de agua.

9.2 Toma de muestras

La precisión en el proceso de operación del sistema de tratamiento depende directamente de la calidad de los datos de monitoreo que se disponga, por tanto, de forma diaria se revisan los siguientes parámetros:

- Flujo de entrada
- Oxígeno disuelto (entrada y salida)
- Temperatura (entrada y salida)

- Fosfatos (entrada y salida)
- Amonio (entrada y salida)

Dos veces por semana se realiza un monitoreo de otros parámetros de control en un laboratorio externo incluyendo entre otros:

- DBO y DQO (entrada y salida)
- Aceites y grasas (entrada y salida)
- Sólidos suspendidos totales (entrada y salida)
- Fenoles
- Hidrocarburos totales

Los puntos de muestreo se ubicaron en:

Tren de tratamiento con aplicación de nutrientes:

- Entrada de laguna 4B (SI Nut)
- Salida de laguna 4B (SI Nut)
- Salida de laguna 5B (SI Nut)

Tren de tratamiento sin aplicación de nutrientes:

- Entrada de laguna 4A (NO Nut)
- Salida de laguna 4A (NO Nut)
- Salida de laguna 5A (NO Nut)

FIGURA 48 LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.

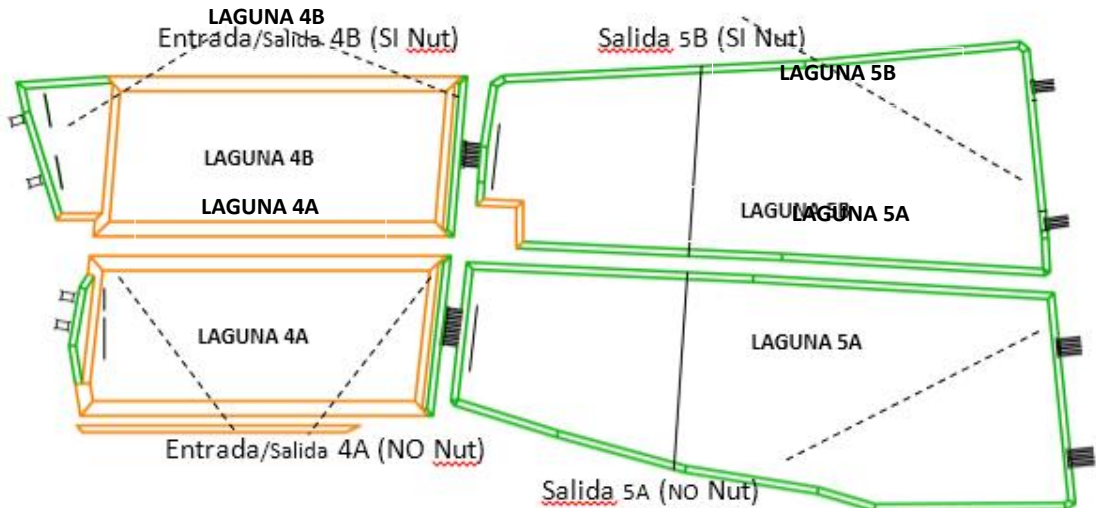


FIGURA 49 EQUIPOS PORTABLES DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA.



FIGURA 50 TOMA DE MUESTRAS Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA.



FIGURA 51 LABORES DE LIMPIEZA DE LÍNEAS DE DOSIFICACIÓN Y DE SONDAS ANALÍTICAS (DERECHA. SONDA DE OXIGENO DISUELTO).



FIGURA 52 INSPECCIÓN DIARIA DE SOPLADORES.



FIGURA 53 INSPECCIÓN DE LÍNEAS DE AIRE (DESDE BOTE). DER. PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES/BACTERIAS.



10.RESULTADOS.

10.1 Remoción de carga orgánica

Luego de siete meses de operación se observaron tendencias de remoción favorables tanto para la demanda química de oxígeno como para la biológica (DBO y DQO).

En las graficas se observan dos curvas tanto para valores de entrada como de salida, esto se debe a que a uno de los trenes de operación (tren de tratamiento B) se le aplicó la solución de nutrientes y al otro no (tren de control) para hacer seguimiento al efecto de esta aplicación en la remoción de parámetros de interés.

10.2 DQO y DBO.

Las concentraciones promedio de entrada y salida (alrededor de 104 ppm y 23 ppm respectivamente) muestran una remoción satisfactoria con un valor de descarga de muy buena calidad cercano a la demanda química de oxígeno de un agua natural (típicamente <50ppm).

Lo mismo se puede decir sobre la DBO con valores de salida (11 ppm) muy por debajo del límite para descarga de acuerdo con las normas de vertimiento (50 ppm).

Ninguna diferencia significativa fue observada en la calidad del agua efluente de los trenes con y sin nutrientes.

A continuación se presenta una tabla resumen de la calidad de agua de entrada y salida del sistema durante el periodo evaluado.

TABLA 12 RESUMEN DE VALORES DE CALIDAD DE AGUA A LA ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA.

	Flow	BOD	COD	Phenols	PO4	P	FOG	TPH	TN	NH ₃ -N	NO ₃	TSS
Entrada L4	m ³ /s	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
AVG	3.65	47.07	104.88	0.45	0.32	0.53	16.25	15.35	5.66	3.31	2.11	16.37
max	4.43	85.00	208.00	1.32	4.03	5.14	82.30	81.50	7.90	5.21	3.92	41.00
min	0.17	12.00	25.00	0.03	0.03	0.01	3.70	4.40	1.97	0.60	0.05	5.00
std dev	0.80	18.51	44.79	0.16	0.69	0.90	13.29	13.08	1.17	0.89	0.95	9.55
Salida L5												
AVG	3.65	11.33	23.64	0.09	0.35	0.61	4.51	4.51	5.51	2.82	2.30	9.40
max	4.43	27.00	59.00	0.83	1.64	4.46	15.70	15.70	7.50	6.12	5.45	26.00
min	0.17	3.00	7.00	0.02	0.03	0.01	0.50	0.50	2.80	0.12	0.04	5.00
std dev	0.80	5.34	9.64	0.10	0.41	0.82	3.36	3.36	0.79	1.12	1.27	4.46

Abreviaciones en la tabla: Flujo (Flow), DBO (BOD), DQO (COD), Fenoles (phenols), Fosfatos (PO4), Fosforo (P), Aceites y Grasas (FOG), Hidrocarburos totales (TPH), Nitrógeno total (TN), Amonio (NH₃-N), Nitratos, Sólidos suspendidos totales (TSS), Promedio (AVG), desviación estándar (std dev).

FIGURA 54 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO, CONCENTRACIONES DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA.

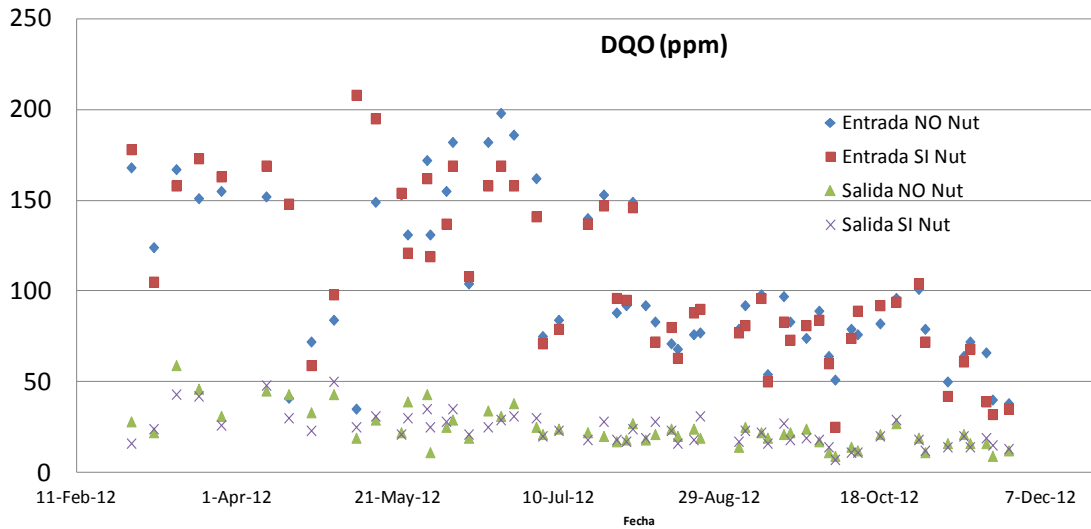
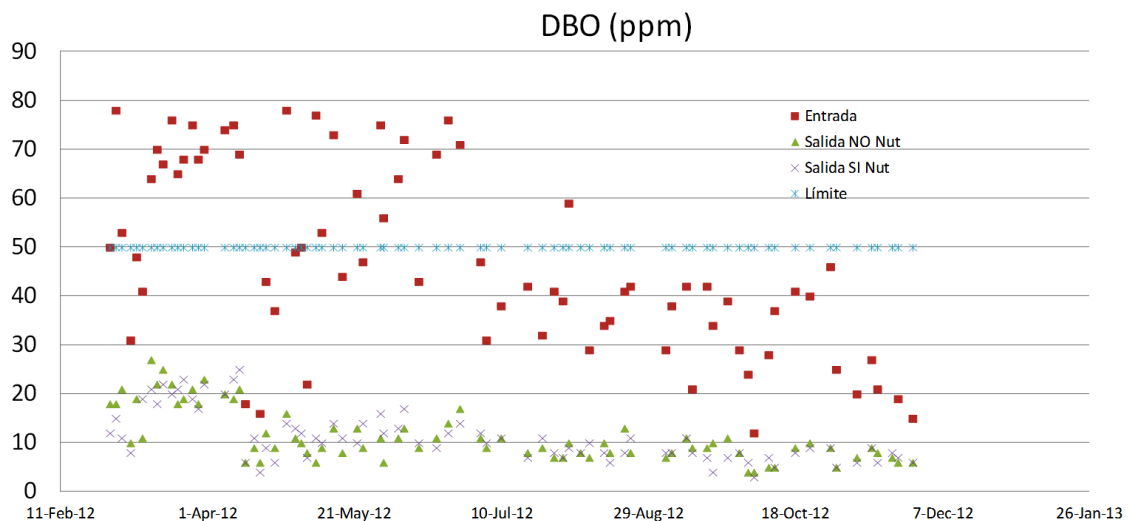


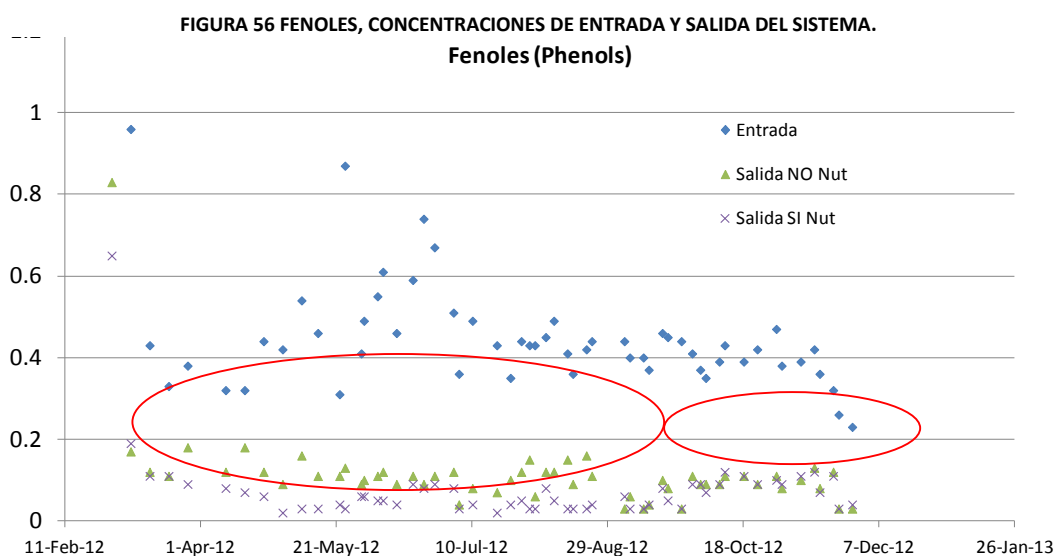
FIGURA 55 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGENO, CONCENTRACIONES DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA.



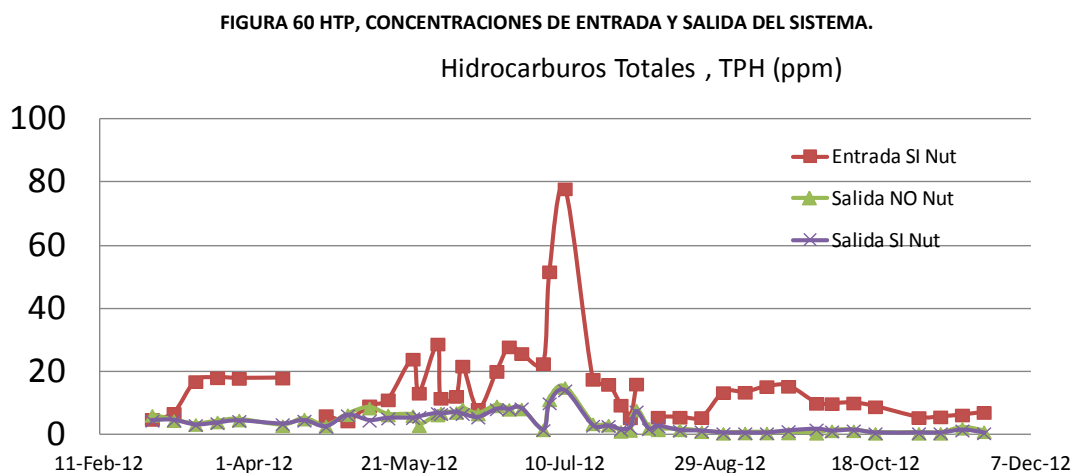
10.3 Remoción de Fenoles.

Los fenoles con compuestos orgánicos con baja solubilidad en agua, por tanto pueden ser removidos hasta cierto punto por medio de *stripping* o intercambio entre fases. En este caso, el agua ya fue sometida a aspersión (como parte del proceso de enfriamiento dentro de la facilidad) y la fracción no disuelta se removió vía *stripping*, la concentración remanente ingresando al sistema (0.45-1.3 ppm) fue metabolizada por organismos heterótrofos de acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 56 Fenoles, concentraciones de entrada y salida del sistema.) donde se observa una concentración de salida estable por debajo de 0.1 ppm.

Es importante resaltar que en la remoción de fenoles se identificó una diferencia entre el desempeño del tren de tratamiento con y sin nutrientes. De acuerdo a los resultados se puede concluir que hay una mejora en la remoción de este parámetro frente al desempeño del tren al que no se le aplicó la solución mencionada. En la gráfica se observan dos tendencias de valores separados hasta el 29 de Agosto cuando se empezó a aplicar nutrientes a los dos trenes por igual, a partir de ese momento los datos de los trenes mostraron los mismos valores demostrando el efecto de la aplicación de nutrientes al menos para los fenoles. (Figura 56 Fenoles, concentraciones de entrada y salida del sistema.)



La remoción de hidrocarburos totales se mantuvo muy estable con valores de salida alrededor de 4.5 ppm incluso cuando la concentración de entrada pasó de un valor medio de 15 a 81 ppm, esto muestra alguna capacidad de amortiguación de la carga de entrada por la respuesta metabólica del sistema de tratamiento.



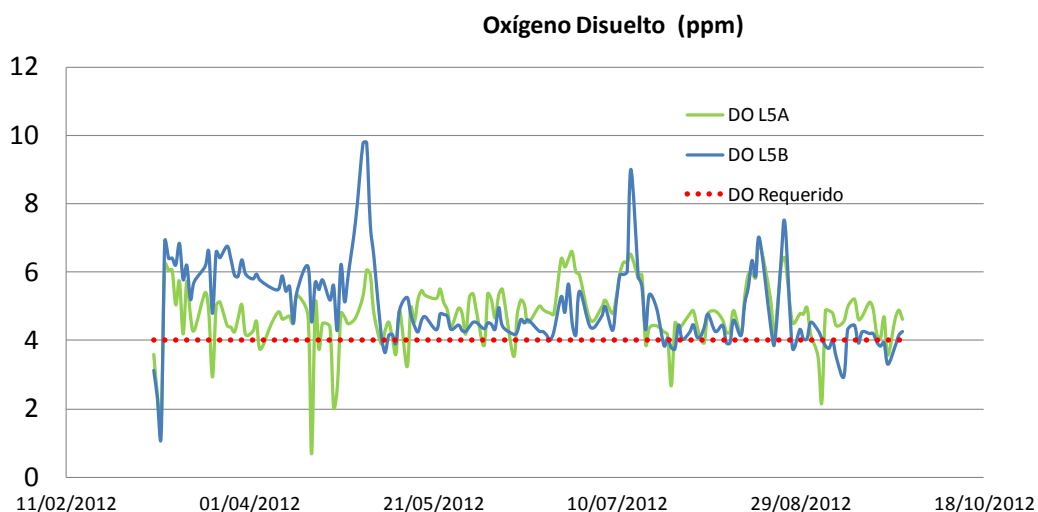
10.4 Oxígeno disuelto.

La concentración de oxígeno disuelto siempre se mantuvo por encima del nivel requerido (4 ppm), lo cual permitió desarrollar pruebas encaminadas a reducir los tiempos de aireación para minimizar el costo de operación asociado con el consumo de potencia del sistema.

Para ello se llevó a cabo una prueba de agotamiento del OD en varios puntos a lo largo de las lagunas en tres diferentes profundidades así:

- Zona alta (H) a 0.5 m de profundidad
- Zona media (M) a 2 m de profundidad
- Zona baja (L) a 4 m de profundidad

FIGURA 57 CONCENTRACIÓN DE OXIGENO DISUELTO SALIDA DEL SISTEMA.

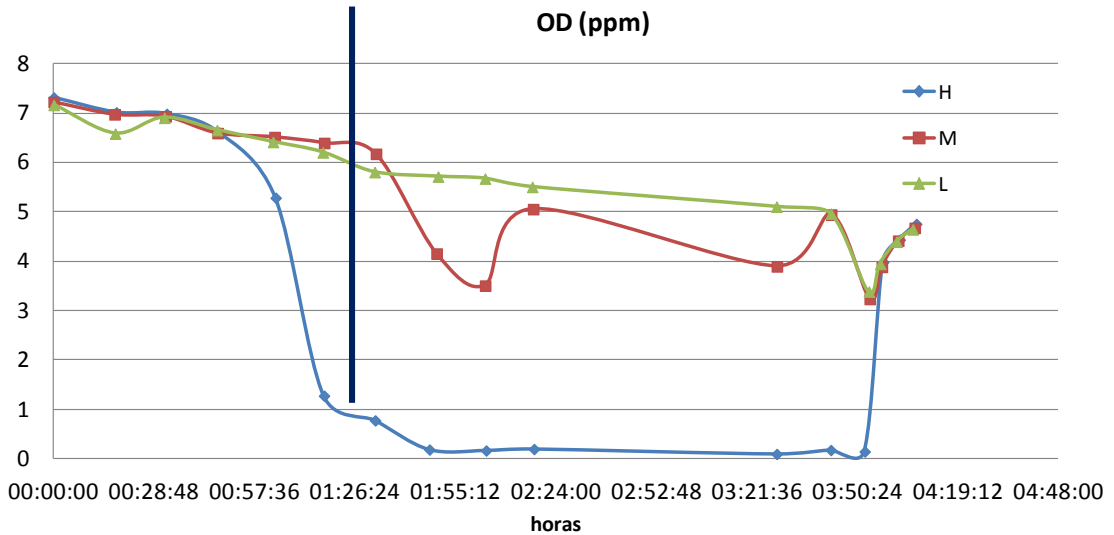


Se midió la concentración de oxígeno disuelto cada 15 minutos durante un periodo de 4 horas en las tres profundidades, el objetivo era determinar cuánto tiempo le toma al oxígeno disuelto bajar a un nivel donde la nitrificación no ocurre (< 1 ppm).

Se encontró que al cabo de 1 hora y 20 minutos luego de apagados los sopladores, la concentración en la parte alta de la laguna (profundidad 0.5 m) cae a menos de 1 ppm de OD; por otro lado, para las partes media y baja de la laguna (profundidad 2 y 4 m respectivamente) la concentración de OD permanece arriba de 3 ppm incluso 3 horas después de haber apagado los sopladores, el tiempo de recuperación de OD una vez se encienden los sopladores es de menos de 30 minutos (ver gráfica. sopladores encendidos después de 3 horas y 50 minutos). Esto permite optimizar el consumo de energía

del sistema de tratamiento ya que se pueden alternar periodos encendido-apagado de los equipos manteniendo aún las condiciones de oxígeno disuelto requeridas.

FIGURA 58 OXIGENO DISUELTO, CURVA DE AGOTAMIENTO.



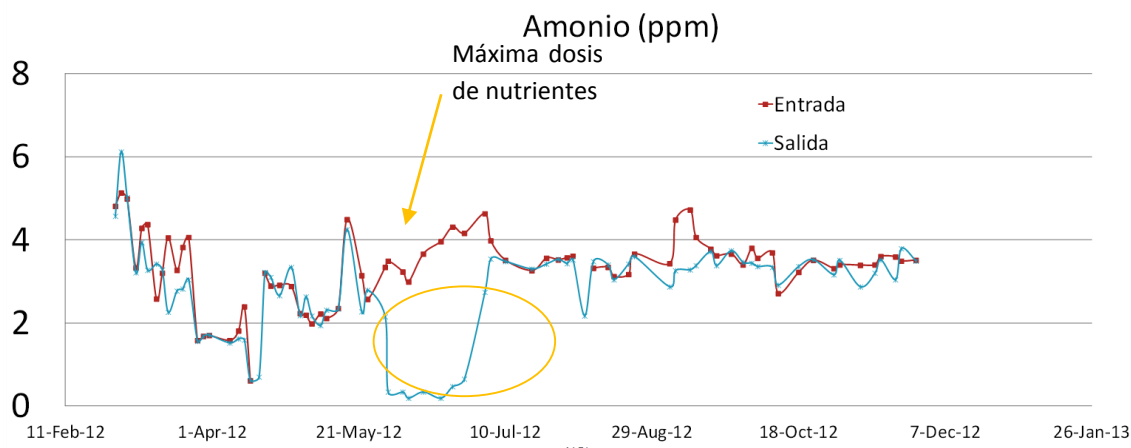
10.5 Amonio

La remoción del nitrógeno en forma de amonio se desarrolla en dos etapas, nitrificación (oxidación desde amonio hasta nitrato) y denitrificación (reducción del nitrato hasta nitrógeno molecular). Cada una de estas etapas es llevada a cabo por microorganismos especializados y particularmente sensibles a condiciones ambientales como temperatura, tiempo de residencia, disponibilidad de nutrientes y presencia de compuestos tóxicos.

Durante los primeros meses de operación no se observó ninguna remoción de amonio con dosis de nutrientes bajas (de 0.2 a 0.7 ppm de fósforo). Cuando la dosis de nutrientes fue aumentada a 0.9 ppm se observó claramente una separación de las curvas de tendencia para calidad de agua de entrada y de salida (que anteriormente mostraban exactamente los mismos valores) confirmando que la remoción de amonio estaba ocurriendo.

Estos resultados se mantuvieron por cerca de un mes para luego regresar a su estado original introduciendo una gran incertidumbre en la operación del sistema, ya que la remoción de amonio se dio por un mes, pero luego se desvaneció por causas que había que determinar.

FIGURA 59 CONCENTRACIÓN DE ENTRADA Y SALIDA AMONIO.



Dentro de las posibles causas que pudieron afectar la remoción de amonio se consideraron:

- Ingreso de sustancias que pudieran inhibir el desarrollo de organismos involucrados en los procesos de nitrificación-denitrificación.
- Pérdida de la biomasa (*washout*) por episodios de alto flujo durante parada y arranque de la facilidad (debido a condiciones de orden público).

Luego de una exhaustiva revisión de los procesos desarrollados dentro de la facilidad en busca de determinar la presencia de agentes que pudiesen causar inhibición de los microorganismos en la lagunas, se encontró que en efecto, el sistema contra incendios empleaba cantidades considerables de un producto biocida para prevenir la corrosión, y que cada semana durante las pruebas del sistema contra incendios se descargaban grandes cantidades de agua con biocida a las cunetas de la facilidad las cuales conducen el agua a la cabeza de las lagunas.

Para compensar este efecto, dado que no se puede suspender las pruebas de los sistemas contra incendios de la facilidad, se diseñó un esquema de aplicación de bacterias nitrificantes que serían "cultivadas" en los tanques del área de nutrientes y posteriormente aplicadas a las lagunas de forma continua. Se observaron cortos periodos con alguna remoción luego de implementado este esquema, pero finalmente se concluyó que con las condiciones operativas de ese momento (con presencia de inhibidores bacterianos) no era viable la remoción de este parámetro.

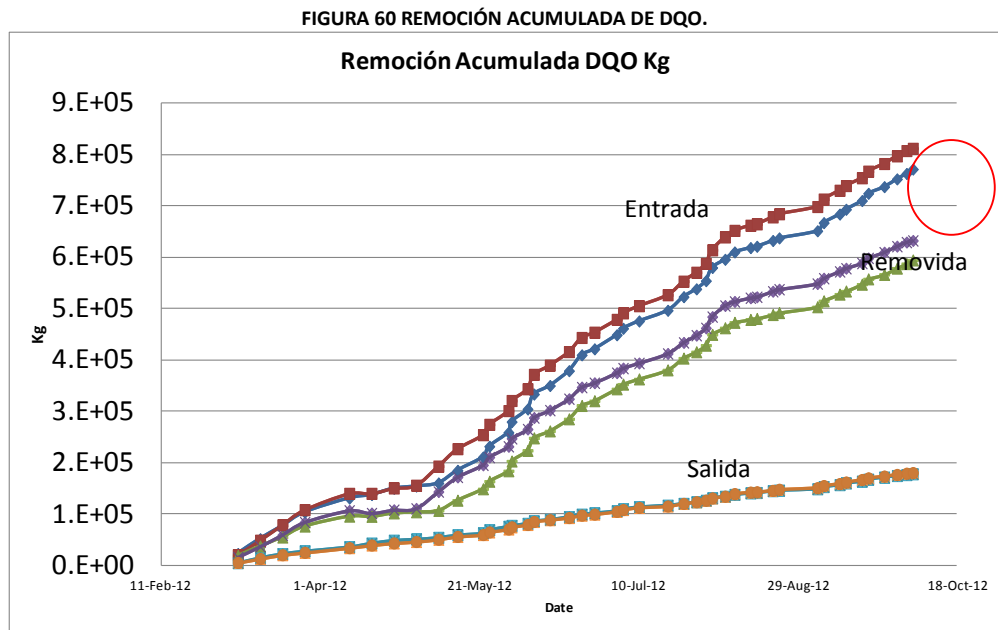
Luego de conocerse la versión final de la nueva norma de vertimientos aplicable, se encontró que el amonio no sería regulado como parámetro de descarga, se decidió abandonar la remoción de amonio como uno de los parámetros objetivo del sistema debido al alto costo que implicaba la aplicación de nutrientes y el cambio en los esquemas de operación dentro de la facilidad.

10.6 Remoción acumulada de carga.

La remoción acumulada de parámetros es una mejor forma de interpretar la magnitud de la carga que se ha dejado de descargar en el ambiente desde la instalación del sistema. Dicha carga acumulada es la diferencia entre el producto del flujo por la concentración en los puntos de entrada y salida del sistema.

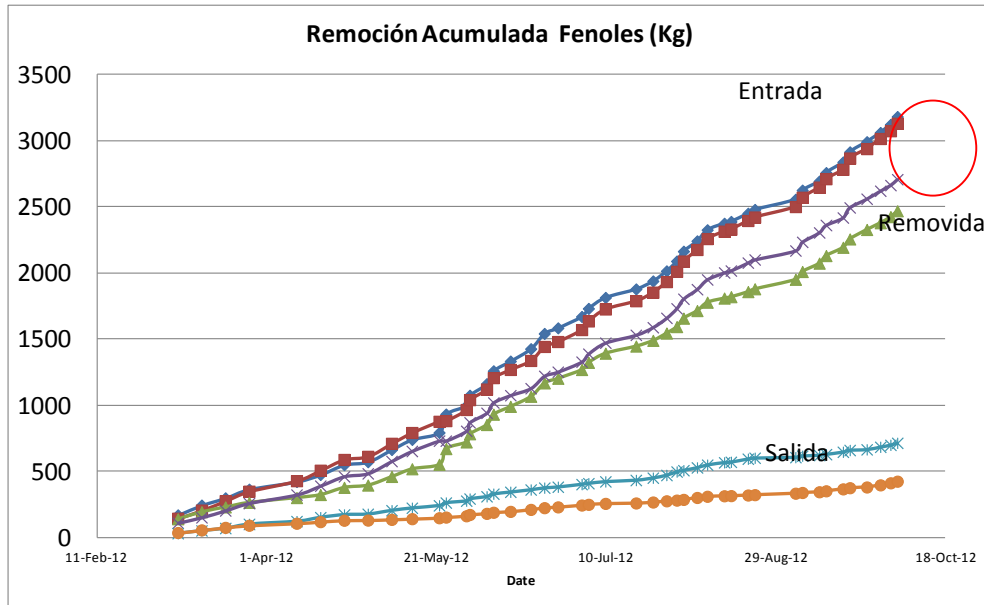
En la Figura 60 Remoción acumulada de DQO.) se ilustra el flujo másico acumulado de DQO a la entrada y salida del sistema, así como la diferencia entre estos dos valores la cual indica la carga removida.

En la gráfica se observa que cerca de 600.000 Kg (600 TON) de carbono en forma de DQO fueron removidas en cada uno de los trenes de tratamiento, también se observa claramente el momento en donde la actividad bacteriano alcanzo su velocidad máxima (cambio de pendiente) un poco antes del 21 de mayo.



En términos de carga acumulada, se puede decir que cerca de 5 (2.5 en cada tren de tratamiento) toneladas de carbono en forma de compuestos fenólicos dejaron de ser vertidas en el ecosistema durante los primeros siete meses de operación del sistema.

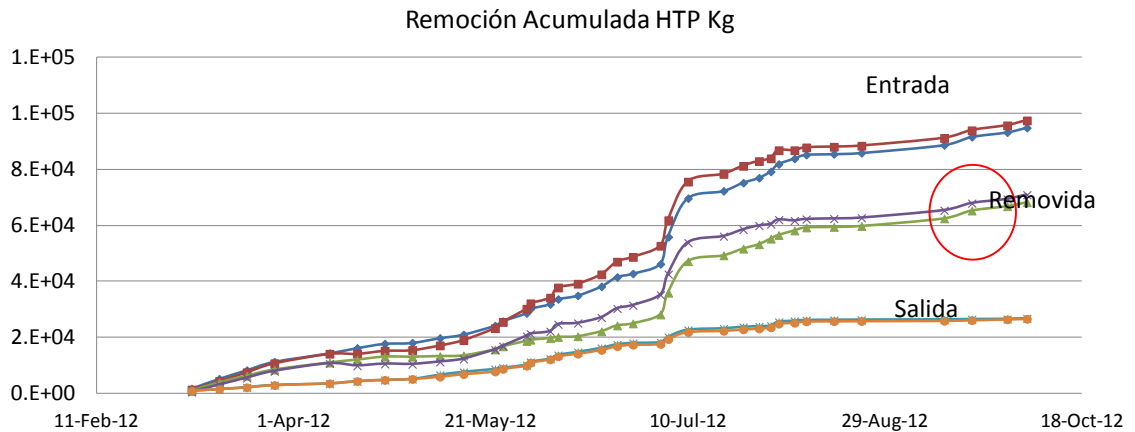
FIGURA 61 REMOCIÓN ACUMULADA DE FENOLES.



10.7 Hidrocarburos Totales.

Alrededor de 70 TON en forma de HTP fueron removidas en cada uno de los trenes de tratamiento durante el periodo evaluado de siete meses.

FIGURA 62 REMOCIÓN ACUMULADA DE HIDROCARBUROS TOTALES.



Esta cantidad de HTP (70 Ton) puede ser un incentivo para desarrollar futuras investigaciones que permitan recuperar el crudo que aparentemente es insignificante si se observa como 1 o 2 ppm a la descarga, pero que al ser sumado y visto de forma acumulada se convierte en una cantidad muy importante, en especial cuando se manejan volúmenes de agua de producción tan altos.

11. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos durante la operación de este sistema prueban la viabilidad de los sistemas biológicos (no convencionales) en el tratamiento de aguas de producción como una alternativa de tratamiento con resultados favorables bajo las condiciones observadas en este caso específico. Sin embargo, la viabilidad para el uso de esta tecnología debe ser evaluada para cada caso en particular y depende directamente de las condiciones de calidad del agua cruda a tratar.

La remoción de carga orgánica (DQO y DBO) se da de forma estable por la naturaleza más robusta y resistente de los microorganismos heterótrofos si se compara con otros microorganismos especializados.

La remoción de fenoles de dio de forma estable y se puede decir que hay una relación entre la dosis de nutriente aplicada y la concentración final de salida (relación entre dosis aplicada y actividad bacteriana).

La remoción de amonio en este tipo de agua es posible (se observó durante el periodo evaluado), sin embargo factores ambientales especialmente la presencia de compuestos que puedan inhibir el desarrollo de bacterias especializadas (más sensibles) pueden disminuir e incluso detener todo proceso de remoción de este compuesto como se observó durante el periodo evaluado.

La concentración de oxígeno disuelto se mantiene por encima de 3 ppm durante casi 4 horas después de haber apagado los sopladores en las zonas baja (4m) y media (2m) de la laguna, eso abre una ventana mayor en términos de optimización de los patrones de aireación para reducir los costos energéticos del proceso de tratamiento. Se recomienda llevar a cabo pruebas para mantener estas concentraciones bajas de OD por periodos de al menos 5 días para monitorear el efecto en la eficiencia del tratamiento.

El sistema probó ser capaz de amortiguar una concentración de entrada de HTP de hasta 81 ppm manteniendo la concentración de salida por debajo de 15 ppm. Se recomienda evaluar métodos para recuperar esta fracción de THP que aún se está descargando con el vertimiento ya que por tratarse de un volumen muy grande de descarga incluso 1 ppm recuperado puede significar beneficios económicos para la compañía en términos de producción.

Este sistema es único en el mundo por su tamaño y por la calidad de agua que en él se trata, por esa razón se recomienda trabajar en conjunto con universidades y centros de investigación para diseñar y poner en práctica experimentos que permitan obtener más datos relevantes en esta facilidad lo cual permitirá extender la aplicación de este tipo de sistemas en otras facilidades a lo largo del país.

Se recomienda evaluar la realización de pruebas de Aireación asistida por algas (foto bioreactores) como en las lagunas facultativas para reducir el consumo eléctrico y hacer el sistema más ambientalmente amigable.

BIBLIOGRAFIA

RICH, Linvil. High performance aerated lagoon systems. American Academy of Environmental Engineers, 1999

SCOTT P, Wallage, et al. CRC Press, 2008.

VAN DER STEEN, Peter. Waste Stabilization Ponds. Lecture Notes UNESCO IHE. 2009

Documentos Privados del proyecto de diseño y construcción del sistema:

Valrex, S.A.S. 2011 "Informe de resultados Prueba piloto del sistema de aireación"

Valrex, S.A.S. 2011 "Reporte de Bases de diseño del proceso de aireación en lagunas".

Valrex, S.A.S. 2011 "Filosofía de operación del sistema de aireación en lagunas"

Valrex, S.A.S. 2011 "Informe de simulación de flujo en lagunas aireadas"

Valrex, S.A.S. 2011 "Diseño de redes de distribución de aire"

Valrex, S.A.S. 2011 "Dimensionamiento de equipos del sistema de lagunas aireadas"

Valrex, S.A.S. 2011 "Procedimientos constructivos del sistema de lagunas aireadas",

Valrex, S.A.S. 2011 "Hojas de datos de los equipos del sistema de lagunas aireadas",

Valrex, S.A.S. 2011 "Ingeniería de detalle del sistema de lagunas aireadas"

VALREX, S.A.S. 2011 "Hoja de cálculo maestra del seguimiento de la operación del sistema de lagunas aireadas".

ANEXOS

ANEXO A TABLA DE ENTRADAS Y SALIDAS SISTEMA DE CONTROL CASETA DE NUTRIENTES

DESCRIPCIÓN	TAG	ENTRADAS		SALIDAS		PLC
		DIGITALES	ANÁLOGAS	DIGITALES	ANÁLOGAS	ADDRES
SOPLADOR 1	7BW-5581					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I4
Selector Automático		1				C1-I1
Selector Manual		1				C1-I2
Mando de Arranque				1		CPU-O5
SOPLADOR 2	7BW-5582					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I5
Selector Automático		1				C1-I3
Selector Manual		1				C1-I4
Mando de Arranque				1		CPU-O6
BOMBA LAGUNA 1	7P-3031					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I6
Selector Automático		1				C1-I5
Selector Manual		1				C1-I6
Mando de Arranque				1		CPU-O7
BOMBA LAGUNA 2	7P-3032					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I7
Selector Automático		1				C1-I7
Selector Manual		1				C1-I8
Mando de Arranque				1		CPU-O8
BOMBA FOSO 1	7P-5531					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I8
Selector Automático		1				C1-I9
Selector Manual		1				C1-I10
Mando de Arranque				1		CPU-O9
BOMBA FOSO 2	7P-5532					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I9
Selector Automático		1				C1-I11
Selector Manual		1				C1-I12
Mando de Arranque				1		CPU-O10
BOMBA DOSIFICADORA 1	7P-5541					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I0

Falla Eléctrica Variador		1				CPU-I1
Selector Automático		1				CPU-I13
Selector Manual		1				CPU-I14
Señal Frecuencia de Salida			1			CPU-AI0
Señal Frecuencia Variador					1	CPU-AI0
Mando de Arranque				1		CPU-O3
BOMBA DOSIFICADORA 2	7P-5542					
Falla Térmica Guardamotor		1				CPU-I2
Falla Eléctrica Variador		1				CPU-I3
Selector Automático		1				CPU-I15
Selector Manual		1				C1-I0
Señal Frecuencia de Salida			1			CPU-AI1
Señal Frecuencia Variador					1	CPU-AI1
Mando de Arranque				1		CPU-O4
VÁLVULA TK 1	MOV-55111					
Selector Automático		1				C1-I13
Selector Manual		1				C1-I14
Posición Abierta		1				C2-I4
Posición Cerrada		1				C2-I5
Falla Térmica Breaker		1				CPU-I10
Mando de Cierre				1		CPU-O12
Mando de Apertura				1		CPU-O11
Indicación de Falla				1		CPU-O1
VÁLVULA TK 2	MOV-55121					
Selector Automático		1				C1-I15
Selector Manual		1				C2-I0
Posición Abierta		1				C2-I6
Posición Cerrada		1				C2-I7
Falla Térmica Breaker		1				CPU-I11
Mando de Cierre				1		CPU-O14
Mando de Apertura				1		CPU-O13
Indicación de Falla				1		CPU-O2
SWITCH DE NIVEL ALTO TK1	LSH5511	1				C2-I8
SWITCH DE NIVEL BAJO TK1	LSL55121	1				C2-I10
SWITCH DE NIVEL ALTO TK2	LSH55121	1				C2-I9
SWITCH DE NIVEL BAJO TK2	LSL55122	1				C2-I11
SWITCH DE NIVEL ALTO SUM	LSH55131	1				C2-I12
PARADA DE EMERGENCIA	PE	1				C2-I1
Bloqueo de mandos				1		CPU-O15

UPS	UPS1					
Suministro Batería		1				C2-12
Batería Baja		1				C2-13
PROTECTOR DE FASES	PF1	1				CPU-112
ALARMA LUMINOSA	AL1			1		CPU-00
TOTAL		45	2	16	2	

ANEXO B HOJA DE DATOS SOPLADORES LAGUNA 4A y 4B

Tipo de Equipo	Soplador/Blower	
Marca	Kaeser	
Modelo	HB1300 PI/83P	
Descripción	Soplador Trilobular Omega paK plus Package con cabina de insonorización y accesorios	
Potencia	175 HP	
Alimentación	460VAC/3F/60Hz	
Condiciones Ambientales		
Temperatura Local	89.6	F
Elevación	459	ft. a.l.s.
Humedad relativa	90	%
Entrada efectiva de Aire en el punto de diseño	3641	icfm
Flujo de entrada en condiciones standard	3302	scfm
condiciones standard a 14.7 psia; 68F;0%HR		
Velocidad de giro en las condiciones de diseño	2255	rpm
Condiciones de Diseño		
Presión de entrada (absoluta)	14.5	psia
Temperatura de entrada	89.6	F
Diferencia de presión	6.9	psig
Presión de descarga (absoluta)	21.5	psia
Temperatura de descarga	172	F
Potencia en el eje del soplador	138.3	bhp
Potencia del Motor	175	hp
Motor enclosure	TEFC	
Type of cooling	Air cooled	
Diametro de conexión	12"	
Eficiencia Volumétrica	0.92	
Nivel estimado de ruido		
Con cabina	76	dB(A)
Sin cabina	97	dB(A)
Dimensiones (LxAxH)		
Con cabina	102x63x98	in
Sin cabina	96x63x93	in
Peso estimado		
Con cabina	8984	lb
Sin cabina	7176	lb
Accesorios incluidos	Válvula Cheque, Válvula de seguridad, manómetro, Termómetro	

ANEXO C HOJA DE DATOS SOPLADORES LAGUNA 5A y 5B

Tipo de Equipo	Soplador/Blower	
Marca	Kaeser	
Modelo	FB790C/64P	
Descripción	Soplador Trilobular Omega paK plus Package con cabina de insonorización y accesorios	
Potencia	60 HP	
Alimentación	460VAC/3F/60Hz	
Condiciones Ambientales		
Temperatura Local	89.6	F
Elevación	459	ft. a.l.s.
Humedad relativa	90	%
Entrada efectiva de Aire en el punto de diseño	2524	icfm
Flujo de entrada en condiciones standard	2289	scfm
condiciones standard a 14.7 psia; 68F;0%HR		
Velocidad de giro en las condiciones de diseño	3170	rpm
Condiciones de Diseño		
Presión de entrada (absoluta)	14.5	psia
Temperatura de entrada	89.6	F
Diferencia de presión	2.9	psig
Presión de descarga (absoluta)	17.4	psia
Temperatura de descarga	124	F
Potencia en el eje del soplador	45.7	bhp
Potencia del Motor	60	hp
Motor enclosure	TEFC	
Type of cooling	Air cooled	
Diametro de conexión	10"	
Eficiencia Volumétrica	0.94	
Nivel estimado de ruido		
Con cabina	75	dB(A)
Sin cabina	96	dB(A)
Dimensiones (LxAxH)		
Con cabina	69x63x82	in
Sin cabina	63x63x82	in
Peso estimado		
Con cabina	4502	lb
Sin cabina	3122	lb
Accesorios incluidos	Válvula Cheque, Válvula de seguridad, manómetro, Termómetro	

Anexo 4

HOJA DE DATOS DIFUSORES LAGUNA 4A y 4B

Tipo de Equipo	Difusor de Aire	
Marca	Standfor Scientific International	
Modelo	AFTS 3100 91mm TUBE	
Descripción	Difusor de Aire de membrana de burbuja fina	
Material	MISC	
Material de membrana	fEPDM	
Condiciones Ambientales		
Temperatura del Agua	104	F
HC en agua	5	ppm
Condiciones de Diseño		
Flujo de diseño	6.88	scfm
Rango de flujo	0-16	F
Área efectiva	4.75	ft ² /set
Presión de trabajo	7	psig
Temperatura de aire	158	F
Dimensiones		
Diametro	91	mm
Longitud	1000	mm
Peso estimado		
	10	lb
Accesorios incluidos	Conector rosca macho ¼"NPT Acero inoxidable	

DIFUSORES LAGUNA 5A y 5B

Tipo de Equipo	Difusor de Aire	
Marca	Standfor Scientific International	
Modelo	AFTS 2100 62mm TUBE	
Descripción	Difusor de Aire de membrana de burbuja fina	
Material	MISC	
Material de membrana	fEPDM	
Condiciones Ambientales		
Temperatura del Agua	104	F
HC en agua	5	ppm
Condiciones de Diseño		
Flujo de diseño	2.5	scfm
Rango de flujo	0-11	F
Área efectiva	4.75	ft ² /set
Presión de trabajo	4	psig
Temperatura de aire	120	F
Dimensiones		
Diametro	62	mm
Longitud	610	mm
Peso estimado		
	7	lb
Accesorios incluidos	Conector rosca macho ¼"NPT Acero inoxidable	