

Diseño de las condiciones óptimas de funcionamiento y tratamiento del residuo de la Planta de Lodos Activados del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



ITCR
Escuela de Química
Ingeniería Ambiental

Proyecto Final de
Graduación

Licenciatura en
Ingeniería Ambiental

01/04/2011

Josué Arrieta Solís
200657673

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Química
Ingeniería Ambiental
Proyecto Final de graduación
Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Título:

**Diseño de las condiciones óptimas de
funcionamiento y tratamiento del residuo de la
Planta de Lodos Activados del Instituto
Tecnológico de Costa Rica.**

Informe presentado a la Escuela de Química
del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Ambiental con el grado en Licenciatura

Miembros del Tribunal

MSc. Ana Lorena Arias Zuñiga
Directora de Tesis

Ing. Jorge Calvo Gutiérrez
Lector 1

Ing. Macario Pino Gómez
Lector 2

Abril, 2011
Cartago, Costa Rica

Dedicatoria

Especial para mi familia, quiénes sin dudar me apoyaron hasta el final.

Agradecimiento

Principalmente a Dios, pues sin él nada hubiera sido posible.

Enormes gracias a toda mi familia, pues siempre estuvieron pendientes.

Además, a quiénes en el día a día fueron compañía y esfuerzo combinado.

¡Infinitas gracias!

Contenido

Definiciones.....	9
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 Resumen.....	12
1.2 Abstract	14
1.3 Antecedentes	15
1.4 Presentación.....	16
1.4.1 Alcance del proyecto.....	17
1.4.2 Descripción de La planta de lodos activados en el ITCR	18
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	19
2.1 Generalidades	19
2.2. Modificaciones del proceso de LA	22
2.2.1. Tipo de aireación.....	22
2.2.2. Tasa de carga.....	23
2.2.3. Configuración del proceso	23
2.3 Microbiología del proceso.....	25
2.4 Parámetros de diseño	26
2.5 Parámetros operacionales	28
2.6 Normativa vigente para el tratamiento de aguas residuales.....	33
CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DE LA PTAR TIPO LODOS ACTIVADOS.....	38
3.1 Proceso de tratamiento	42
3.2 Criterios de diseño de la planta	44
3.3 Parámetros operacionales de la planta	44
3.4 Lodos activados con aireación extendida	46
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	47
4.1 Puesta en marcha de la planta.....	47
4.2 Probar combinaciones de parámetros para el arranque de la planta	49
4.3 Caracterizar afluente.....	49
4.4 Caracterizar el funcionamiento óptimo de la planta	51

4.5 Verificación del funcionamiento y eficiencia de los procesos	51
4.6 Elaborar un diagnóstico sobre la eficiencia del tratamiento de aguas y comparar la eficiencia práctica con la teórica.....	52
4.7 Caracterizar efluente.....	52
4.8 Caracterizar desechos, clasificarlos.....	53
4.9 Búsqueda y aplicación de alternativas de aprovechamiento, uso y disposición	54
4.10 Capacitar a los administradores de la planta sobre el funcionamiento de la planta.....	54
CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
5.1 Poner en marcha la planta	55
5.2 Probar combinaciones de parámetros para el arranque de la planta	57
5.3 Caracterizar afluente.....	60
5.4. Caracterizar el funcionamiento óptimo de la planta	64
5.5 Verificación del funcionamiento y eficiencia de los procesos	69
5.6. Elaborar un diagnóstico sobre la eficiencia del tratamiento de aguas y comparar la eficiencia práctica con la teórica.....	72
5.6.1. Factores que inciden en la eficiencia de la planta	72
5.6.2. Diferencias entre las instalaciones y los documentos de diseño y operación de la planta .	74
5.7 Caracterizar efluente.....	78
5.8 Caracterizar desechos, clasificarlos.....	79
5.9 Búsqueda y aplicación de alternativas de aprovechamiento, uso y disposición	81
CAPÍTULO 6 LA REALIDAD DE LA PLANTA CONSTRUIDA	84
6.1 Repercusiones en la ejecución del proyecto de graduación.....	84
CAPÍTULO 7 CONCLUSIÓN	88
7.1 Conclusiones	88
7.2 Recomendaciones.....	91
7.3 Bibliografía	93

Índice figuras

Figura 2.1. Diagrama del proceso de lodos activados.....	20
Figura 2.2. Parámetros que definen las variantes del proceso convencional de LA.	22
Figura 3.1. Planta de lodos activados del ITCR.....	38
Figura 3.2. Componentes de la planta que intervienen en la depuración de las aguas residuales....	40
Figura 3.3. Panel de control..	41
Figura 3.4. Diagrama del proceso de tratamiento de la planta de LA del ITCR.	42
Figura 3.5. (a) Ubicación del bypass en la planta. (b) Bypass para el desvío del agua cruda hacia la planta.....	43
Figura 4.1. Prueba hidrostática, llenado con agua potable de la planta de lodos activados.	47
Figura 4.2. Lodo inóculo, proveniente de la segunda laguna de oxidación del ITCR.	48
Figura 5.1. Espuma en el tanque de aireación.....	56
Figura 5.2. Variación de la DBO y DQO entre lunes y viernes en el Qa.....	62
Figura 5.3. Comportamiento de distintos parámetros del agua cruda durante la semana.	63
Figura 5.4. Influencia de la edad de los lodos en la sedimentabilidad de estos.	68
Figura 5.5. Comportamiento del oxígeno disuelto en el TA respecto de la frecuencia del aireador.....	69
Figura 5.6. Diagrama de flujo del proceso de la PTAR del ITCR.	75
Figura 5.7. Tanque adicional en la planta de lodos activados.....	76

Índice cuadros

Tabla 2.1. Descripción de algunas modificaciones del proceso convencional de LA.	24
Tabla 2.2. Parámetros de diseño para procesos de LA.....	27
Tabla 2.3. Valores comunes de coeficientes cinéticos para aguas residuales ordinarias.	30
Tabla 2.4. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.	34
Tabla 2.5. Límites máximos permisibles para los parámetros obligatorios complementarios de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.	35
Tabla 2.6. Frecuencia mínima de muestreo y análisis para aguas residuales de tipo ordinario.	36
Tabla 3.1. Características del agua residual a tratar por la planta.	44
Tabla 3.2. Características de la planta de lodos activados.	45
Tabla 3.3. Propiedades del efluente generado por la planta de lodos activados.	45
Tabla 3.4. Parámetros de diseño para una planta de lodos activados con aireación extendida.	46
Tabla 4.1. Variación del caudal afluente (Q_a) durante la alimentación del sistema con agua residual.	48
Tabla 4.2. Muestreo compuesto del afluente.....	50
Tabla 4.3. Requerimientos para análisis fisicoquímicos de muestras.	51
Tabla 5.1. Resultados obtenidos durante la combinación de parámetros.....	57
Tabla 5.2. Caracterización del caudal afluente*	60
Tabla 5.3. Valores promedios de las características del agua cruda.	60
Tabla 5.4. Composición fisicoquímica típica de aguas residuales domésticas.	64
Tabla 5.5. Valores promedios de las características del agua tratada.	78
Tabla 5.6. Concentración de nitrógeno en los lodos secos, método Kjeldahl.....	79

Definiciones

Afluente: refiere al caudal de agua cruda que ingresa en el sistema de tratamiento de aguas residuales.

d: días.

DBO: demanda bioquímica de oxígeno. Valor empleado para medir la contaminación orgánica presente en aguas. Su determinación se relaciona con la medición del oxígeno disuelto que utilizan los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica (Metcalf & Eddy, 1996).

DQO: demanda química de oxígeno. Determina la cantidad de oxígeno disuelto que consumen compuestos químicos en la oxidación de la materia orgánica. La prueba utiliza un agente oxidante en medio ácido para determinar el equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. La DQO de un agua residual puede llegar a ser mayor que su correspondiente DBO. Esto sucede por la presencia de un número mayor de compuestos químicos que son oxidados químicamente, en lugar de biológicamente (Metcalf & Eddy, 1996).

Efluente: corresponde al caudal de agua tratada que se descarga del sistema de tratamiento de aguas residuales.

GyA: Grasas y Aceites. Análisis mediante el cual se mide el porcentaje de grasas y aceites presente en una muestra de agua.

Hz: Hertz, unidad de medida de frecuencia.

IA: Ingeniería Ambiental

kg: kilogramos.

LA: Lodos Activados.

mg/l: miligramos por litro.

m^3 : metros cúbicos.

OD: Oxígeno Disuelto.

pH: Potencial de Hidrógeno. Medición de la acidez o basicidad de una muestra de agua.

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Qa: Caudal afluente.

Qmáx: Caudal afluente máximo de diseño.

Qr: Caudal de recirculación.

Relación de recirculación (Q_r/Q_a): Valor porcentual con el cual se define el caudal de recirculación en una planta de lodos activados. El valor se define con base en el caudal afluente a la planta.

SAAM: Sustancias Activas al Azul de Metileno. Análisis químico para determinar la concentración de sustancias tensoactivas en una muestra de agua.

SS: Sólidos Suspendidos. Concentración de sólidos suspendidos en una muestra de agua.

SSed: Sólidos Sedimentables. Prueba que determina la concentración de sólidos que sedimentan en una muestra de agua de 1l durante 30min o 1 hora. Para la determinación se emplean conos Imhoff o probetas.

SSLM: Sólidos Suspendidos en el Licor Mezclado. Valor correspondiente a la concentración de materia suspendida dentro del tanque de aireación en un sistema de tratamiento de aguas residuales tipo lodos activados.

SSVLM: Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor Mezclado. Concentración de materia suspendida combustible dentro del reactor biológico de lodos activados. Refiere a la materia orgánica dentro del tanque de aireación, contempla sólidos inorgánicos (Winkler, 1999).

T: Temperatura.

TA: Tanque de Aireación. Reactor biológico de una planta de lodos activados. En él ocurre la depuración del agua cruda.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

Hacia un reforzamiento académico en la carrera Ingeniería Ambiental del ITCR, se instaló una PTAR tipo lodos activados. Esta unidad fue diseñada por Durman Esquivel S.A., fue ubicada cerca de las lagunas de oxidación del instituto.

Para arrancarla, se aplicó un inóculo con lodo de una laguna de oxidación y se alimentó gradualmente con agua residual. Después de un mes el sistema alcanzó su estabilidad.

La planta recibe aguas con un promedio de 148mg DBO/l. Durante su operación, se logró tratar el afluente con una eficiencia del 82%, generando un efluente con 25mg DBO/l.

No obstante, la planta por motivos de diseño y de construcción presenta problemas operativos. Entre ellos:

- a. Tuberías sobredimensionadas, de forma que cuando se regula el Q_a , la válvula se obstruye.
- b. La tubería de recirculación también se obstruye e induce un esfuerzo mayor a la bomba.
- c. El panel de control posee componentes de poca resistencia, que se dañan y desestabilizan el funcionamiento del sistema.

Estas situaciones retrasaron el arranque y la evaluación de la eficiencia.

Este escenario refleja la realidad vigente en el país. PTAR que trabajan con eficiencias pobres o nulas. Considerando problemas de diseño y construcción en las plantas de paquete. Por tanto, el sistema depurativo constituye un paso más hacia la contaminación de un cuerpo de agua. Ello, frente a escasa fiscalización por parte de los entes encargados, quienes velan por el cumplimiento de la legislación.

Palabras claves: aguas residuales, planta de tratamiento, lodos activados.

1.2 Abstract

As an academic reinforcement, the ITCR Environmental Engineering career installed an activated sludge wastewater treatment plant. This unit was designed by Durman Esquivel S.A., and it was located near the oxidation lagoons of the institute.

In order to run the system, it was inoculated with sludge originated at the second ITCR oxidation lagoon. It was gradually fed with wastewater, and after a month of work it reached stabilization.

The plant receives raw waters with an average DBO concentration of 148mg/l. During its operation, the plant treated the inflow with an efficiency of 82%, which generated an effluent with 25 DBOmg/l.

Nevertheless, due to design and construction mistakes, the plant possesses operational problems. Among them:

- a. Overdimensioned pipes. Reason why valves obstruct when regulating incoming flow.
- b. The recycling pipe presents the same obstruction, which induces bigger efforts on the pump.
- c. The control panel possesses low quality electric components that receive damage constantly due to electric current fluctuations. This results into functioning detentions.

Because of these situations, the evaluation of the plant's efficiency was delayed.

This scenario reflects the actual reality of the country. Where wastewater treatment plants work with low efficiencies or do not work at all. Thus, they become an extra pathway which wastewater follows towards a natural river bed. Moreover, there's a poor authority inspection, which imply, these plants do not observe legislation requirements.

Keywords: wastewater, treatment plants, activated sludge.

1.3 Antecedentes

El país se encuentra frente a un crecimiento poblacional e industrial. Esto genera un aumento en la producción de aguas residuales domésticas e industriales y por ende un aumento en la contaminación del medio. Ante esta situación, urge la creación de opciones para su remediación. Para ello, la elaboración de mayores alternativas tecnológicas, alcanzadas con mejores insumos durante la formación académica.

De aquí, la adquisición de conocimiento a través de la práctica, ha impulsado a los coordinadores de la carrera Ingeniería Ambiental (IA) a buscar opciones para brindar esa posibilidad al estudiantado. Ante ese esfuerzo, la obtención de equipo y material didáctico se ha dificultado debido a presupuestos limitados.

No obstante, se consiguió la instalación de una nueva planta de lodos activados (o sistema de tratamiento de aguas residuales) en las cercanías de las lagunas de oxidación que el Instituto Tecnológico de Costa Rica posee. Esta planta brindará un apoyo metodológico y práctico para un reforzamiento al currículo de la carrera IA.

Con la planta se dispone de un lugar para la realización de prácticas, con el fin de modelar el comportamiento del tratamiento de aguas residuales, mediante el tipo de procesos de lodos activados. Con la incorporación de esta nueva planta, los estudiantes de la carrera IA adquirirán una mayor experiencia y retroalimentación sobre ese proceso de depuración de residuos líquidos.

1.4 Presentación

El ser humano en su cotidianeidad emplea los recursos naturales para su beneficio. En su desarrollo, genera productos a partir de esos recursos y altera sus alrededores. Dado a su evolución, el ambiente ha sido alterado en la mayor parte de su extensión.

Tanto el sector industrial como el doméstico generan aguas residuales. Su carga contaminante es dirigida hacia toda clase de cuerpos receptores, y también hacia el alcantarillado sanitario. El constante vertido de estos residuos líquidos genera contaminación en cuerpos de agua y pone en riesgo el delicado balance que mantiene viva la naturaleza.

Ante tal realidad, surge la necesidad de conocer la composición de esas aguas residuales para generar propuestas hacia su remediación. Por ejemplo las aguas residuales domésticas constituyen desechos con contaminación fecal, grasas y detergentes. Mientras los residuos industriales presentan composiciones específicas de cada línea productiva (TECSPAR, 2009).

Así como se requieren opciones de tratamiento, también la legislación debe ir creciendo. Todo acompañado de una estructura estricta y de mucha fiscalización gubernamental. Con esto, se protegerán los medios acuáticos, que constituyen un punto indispensable del ciclo natural.

1.4.1 Alcance del proyecto

El desarrollo del proyecto responde al objetivo general: *Evaluado y optimizado el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados que dispone la carrera Ingeniería Ambiental (IA), para su posterior uso en el reforzamiento del currículo de la carrera.* Es decir, con el empleo del sistema de tratamiento se ofrecerá un aporte extra al nivel académico de las materias impartidas en la carrera IA.

Para lograr el objetivo general planteado, se realizó un análisis de la problemática en torno a la planta de LA y a partir de esta se definieron los siguientes objetivos específicos:

1. Administrada la planta de acuerdo con lo estipulado en su diseño. A través del cumplimiento de este objetivo, los administradores podrán utilizar la planta de lodos activados de forma que puedan manejar sus parámetros y operaciones unitarias sin generar un desequilibrio en el sistema. Conocerán lo que estipula su diseño por lo que podrán controlar cualquier eventualidad emergente en el funcionamiento del sistema.

En otras palabras, se conocerá el funcionamiento óptimo de la planta de forma tal que los administradores podrán emplearla sabiendo de antemano qué factores pueden generar algún problema en el sistema que desestabilice la planta. Podrán cambiar los parámetros de trabajo de la planta y conocer previamente la forma de recuperar la actividad óptima de la misma. Asimismo podrán verificar si la eficiencia práctica difiere a la de diseño, de forma tal que en caso de alguna diferencia pueda identificarse el problema y corregírsele.

2. Optimizado el efluente para su vertido al cuerpo receptor. Con esto, se conoce si la planta en su operación, genera un efluente que se encuentre cumpliendo los parámetros establecidos por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Esto muestra directamente la eficiencia y las condiciones de desempeño del sistema.

Para conocer esto, se analizarán las propiedades fisicoquímicas con que el efluente es descargado al cuerpo receptor. Para que se alcance la calidad óptima de vertido, las operaciones unitarias de la planta de LA deben llevarse a cabo eficientemente, por lo que con este proyecto se estarán realizando acciones de monitoreo y seguimiento a las operaciones de la planta.

3. Aprovechado, usado y dispuesto el residuo de la planta. De forma que los subproductos de la planta de LA reciban un tratamiento adecuado y una disposición correcta para evitar contaminación y aprovechar la composición de esos residuos.

Además, con esto se logra conocer la composición de los residuos y se busca obtener un valor agregado a partir de ellos, al constituir subproductos generados en la planta de lodos activados.

1.4.2 Descripción de La planta de lodos activados en el ITCR

Cuenta con un tratamiento primario compuesto por rejillas para separar sólidos gruesos, seguido a esto el sistema posee un tanque de aireación (reactor) donde se da la depuración de aguas a través de un proceso biológico. Posterior al reactor, se encuentra un sedimentador o clarificador. Los lodos obtenidos del tanque de aireación como del sedimentador son recolectados y dirigidos hacia un digestor de lodos para luego pasar a un lecho de secado (Calvo, 2010). Con esto, se realiza el tratamiento de las aguas residuales y es posible descargar al cuerpo receptor, un efluente que cumple con los parámetros establecidos por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.

Es así como con las operaciones de la planta se pueden combinar los parámetros adecuados para propiciar el funcionamiento óptimo del sistema de tratamiento de aguas residuales. De forma tal, que con un aporte correcto de oxígeno al tanque de aireación, la concentración adecuada de lodos junto con la combinación apropiada de nutrientes, un correcto funcionamiento hidráulico de la planta así como un seguimiento estricto de los lineamientos de diseño, permitirán que la planta de lodos activados funcione óptimamente, resultando en un efluente que cumpla con la legislación correspondiente.

En el capítulo 3 de este documento se da un enfoque más amplio acerca de la planta instalada.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

Ante la urgente necesidad de remediación del ambiente natural, han surgido toda clase de alternativas para la reducción de la contaminación en los diferentes compartimentos ambientales. Entre estos últimos, uno de los primordiales, sino el principal, el agua.

Día a día los cauces naturales reciben cargas orgánicas que ocasionan su contaminación y su desequilibrio natural. Ante esto, han surgido distintos sistemas y tratamientos para reducir su contaminación.

De las distintas alternativas, los procesos biológicos ofrecen opciones accesibles y de diferentes dificultades en su instalación. Son sistemas versátiles, capaces de adaptarse a variadas situaciones.

Estos procesos biológicos se pueden diferenciar dependiendo de la disponibilidad de oxígeno en ellos. De tal forma, pueden encontrarse procesos aerobios, anaerobios, así como anóxicos, o combinaciones entre estos tres. Cada uno de ellos, puede a su vez clasificarse según la colocación de la masa biológica. Es decir, según los microorganismos se encuentren dispersos en suspensión, o en sistemas de cultivo fijo, o alguna combinación de ambas disposiciones (Metcalf & Eddy, 1996).

En los procesos de cultivos en suspensión, la flora microbiana encargada de la depuración de los residuos líquidos hacia gases y tejido celular, permanece suspendida dentro del agua residual en un reactor (Metcalf & Eddy, 1996).

Dentro de los cultivos en suspensión, el proceso de lodos activados (LA) constituye el tratamiento biológico aerobio de mayor uso para la depuración de aguas residuales (Winkler, 1999).

El tratamiento con LA se desarrolló en Inglaterra durante 1914. Su nombre deriva de la producción de una masa activa de microorganismos que logra estabilizar un residuo líquido mediante la vía aerobia (Metcalf & Eddy, 1996).

En estos sistemas biológicos, la masa de microorganismos se encuentra constantemente provista por materia orgánica y oxígeno. Los microorganismos se desarrollan formando flóculos, los cuales se encargan de la transformación de la materia orgánica a nueva masa microbiana, agua y dióxido de carbono (Horan, 1990).

El proceso de forma general, puede verse como muestra el siguiente esquema.

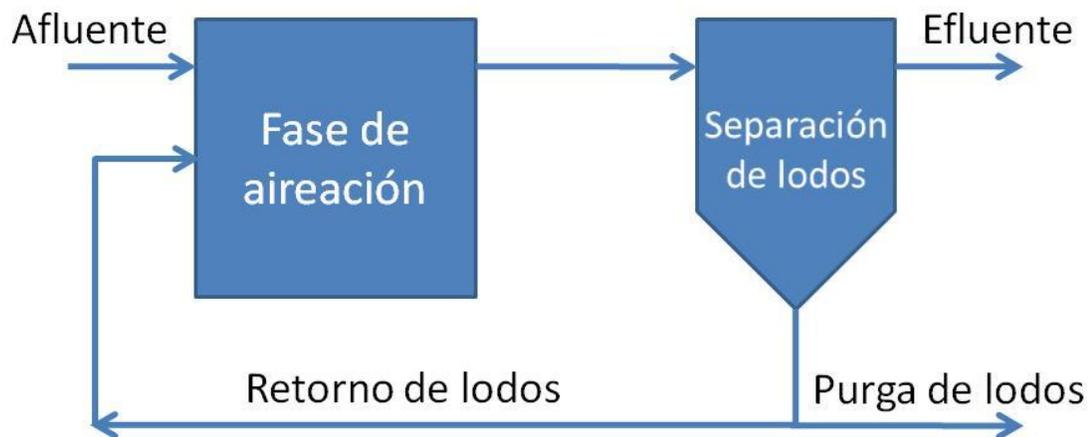


Figura 2.1. Diagrama del proceso de lodos activados.

Fuente: Adaptado de Winkler, 1999.

Como muestra la figura 1, el proceso consiste en una etapa de aireación donde el conglomerado microbiano en suspensión recibe el agua residual con un caudal afluente, Q_a . Estos dos componentes se mezclan y originan el *licor mezclado* (Metcalf & Eddy, 1996).

La masa contenida dentro del tanque de aireación se mide mediante la concentración de *sólidos suspendidos* o *sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado*, *SSLM* o *SSVLM*.

Con unidades de masa por volumen: mg/l, g/l, kg/m³. Estos sólidos suspendidos representan los lodos biológicos, constituidos por poblaciones heterogéneas de microorganismos.

En el reactor, los microorganismos transforman esa materia orgánica gracias al suministro de oxígeno y la agitación uniforme (Winkler, 1999). Posterior a esa etapa de aireación, la masa es constantemente dirigida hacia un tanque de sedimentación. En este tanque se da la separación de lodos, debida a la sedimentación de los flóculos (Horan, 1990). Gracias a esto último, se obtiene un efluente clarificado, libre de sólidos (Metcalf & Eddy, 1996).

Una de las propiedades características de los LA reside en el reciclaje de una fracción de los lodos separados en la etapa de sedimentación. El retorno de estos lodos hacia el tanque de aireación permite mantener una cantidad suficiente de sólidos para la depuración de aguas residuales (Horan, 1990). Asimismo, esta recirculación sirve como inóculo microbiano, al introducir y variar frecuentemente la calidad del lodo en la fase de aireación (Winkler, 1999).

Parte de lodos separados son desechados del sistema mediante una purga. Esta fracción purgada corresponde, en un sistema equilibrado, al crecimiento celular dado durante la transformación de la materia orgánica (Metcalf & Eddy, 1996).

2.2. Modificaciones del proceso de LA

La figura 1 expone el sistema convencional de LA. Sin embargo, este proceso puede presentar un gran número de variantes, las cuales giran alrededor de los siguientes parámetros:



Figura 2.2. Parámetros que definen las variantes del proceso convencional de LA.

Fuente: Adaptado de Horan, 1990.

Estas variaciones aportan una gran versatilidad al proceso de LA y le permite adaptarse a diferentes necesidades de tratamiento.

2.2.1. Tipo de aireación

El requerimiento fundamental que debe cumplir el sistema de aireación reside en una transferencia de oxígeno al licor mezclado, equivalente al pico de demanda de este. Además, es indispensable que se lleve a cabo una mezcla uniforme en el reactor, que evite la generación de puntos con ausencia de oxígeno (Winkler, 1999). El suministro de este gas, según Horan (1990), puede realizarse de dos maneras, sea por aeración mecánica o por difusores de aire.

- a. *Aireadores mecánicos*: transfieren oxígeno mediante agitación del líquido superficial. Así, el oxígeno en la atmósfera entra en contacto con el licor mezclado. Con la agitación, tanto el afluente como el lodo se mantienen en suspensión mientras que se evita la sedimentación de los flóculos.
- b. *Difusores de aire*: son colocados en la base del reactor y liberan aire hacia el licor mezclado en flujos de burbujas. De tal manera, mientras se elevan las burbujas, la transferencia del oxígeno se efectúa en la interfase de estas y el agua. Las corrientes de burbujas generadas, permiten también mantener el licor mezclado en suspensión.

2.2.2. Tasa de carga

Este factor permite describir la tasa a la cual es agregada una carga de contaminante al reactor biológico. La adición de esta carga repercute en la calidad de efluente del sistema pues modifica entre otras cosas, las propiedades de sedimentación del lodo, la eficiencia en la depuración del agua residual y la edad del lodo. Para ello, se pueden utilizar tres parámetros básicos (Horan, 1990):

- a. *Carga volumétrica*: determina el tiempo en el cual se aireará el agua residual en el reactor. También se conoce como el tiempo de retención hidráulica. Para ello, el volumen del tanque de aireación debe permitir un tiempo de contacto adecuado entre el afluente y los flóculos de lodo.
- b. *Carga orgánica*: refiere a la cantidad de DBO aplicada por unidad de volumen del tanque de aireación. Esta carga varía continuamente de acuerdo con las fluctuaciones diarias de la calidad del afluente.
- c. *Relación F/M*: consiste en la tasa de carga de lodos, cuya magnitud influye en el comportamiento biológico del lodo hacia la depuración del residuo líquido.

2.2.3. Configuración del proceso

El proceso de LA presenta mucha flexibilidad para el tratamiento de diferentes residuos líquidos. De aquí, el proceso convencional ha sufrido varias modificaciones que se han logrado normalizar. Algunas de estas modificaciones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Descripción de algunas modificaciones del proceso convencional de LA.

Modificación del proceso	Descripción	Eficiencia de eliminación de DBO (%)
Convencional	Empleo de un flujo en pistón. En el tanque de aireación se mezcla el licor mezclado con aire disuelto o agitadores mecánicos.	85-95
Reactor de mezcla completa	El afluente y los lodos recirculados son introducidos en el tanque de aireación en diferentes puntos del reactor. Se mantienen constantes la carga orgánica y la demanda de oxígeno en todo el tanque de aireación.	85-95
Aireación graduada	A lo largo del reactor, la aireación se aplica en diferentes intensidades. La mayor intensidad se aplica hacia el inicio del reactor, disminuyendo hacia el final de este.	85-95
Aireación con alimentación escalonada	El afluente es introducido en el tanque de aireación en diferentes puntos con el fin de mantener un valor determinado de la relación F/M.	85-95
Contacto y estabilización	Emplea dos compartimientos separados para la depuración del agua residual y la estabilización del lodo.	80-90
Aireación prolongada	Requiere una carga orgánica baja y un largo periodo de aireación.	75-95
Aireación de alta carga	Combina altas concentraciones de sólidos del licor mezclado con altas cargas volumétricas. Con ello, se obtiene una alta relación F/M y largos tiempo de retención celular, con tiempos de retención hidráulica bajos.	75-95
Reactor Deep Shaft	El tanque de aireación se sustituye por un pozo de aproximadamente 100m de profundidad. El licor mezclado y el aire se fuerzan a circular en trayectoria descendente por el centro del pozo, mientras ascienden por la parte exterior.	85-95

Fuente: adaptado de Metcal & Eddy, 1996.

2.3 Microbiología del proceso

Los lodos se encuentran constituidos por una unidad ecológica denominada flóculo individual. Cuya composición presenta cúmulos de millones de bacterias en conjunto con algunos otros organismos, materias inertes, orgánicas e inorgánicas.

Flóculos de gran tamaño tienden a estar formados por bacterias muertas, rodeados por bacterias activas viables. En tanto, flóculos de menor tamaño se constituyen de una proporción mayor de bacterias vivas (Stafford y Calley, 1977¹).

El proceso de lodos activados se encuentra protagonizado por varios géneros de bacterias, entre ellos:

- a. Pseudomonas
- b. Zoogloea
- c. Achromobacter
- d. Flavobacterium
- e. Nocardia
- f. Bdellovibrio
- g. Mycobacterium
- h. Nitrosomas
- i. Nitrobacter

Las bacterias son las principales degradadoras de la materia orgánica afluyente al sistema. En el reactor biológico, estas bacterias aerobias o facultativas utilizan esa materia para obtener la energía necesaria en la síntesis de células nuevas (Metcalf & Eddy, 1996). De los distintos géneros de bacterias, las heterotróficas son las encargadas principalmente de la disminución en la carga orgánica del afluyente (Horan, 1996).

¹ Citado por Winkler, 1999.

No obstante, en plantas tipo LA , también pueden encontrarse protozoarios y rotíferos. Estos últimos consumen cualquier partícula biológica que no haya sedimentado, mientras que los primeros se encargan de pulir el tratamiento de aguas residuales mediante el consumo de bacterias dispersas que no han floculado (Metcalf & Eddy, 1996). Asimismo, secretan una mucosidad que fortalece la estructura del flóculo (Horan, 1996).

2.4 Parámetros de diseño

Para diseñar un sistema de tratamiento tipo LA es importante tener en cuenta ciertos parámetros que definirán el funcionamiento adecuado de la planta de depuración de aguas residuales. A continuación se muestra una tabla donde se enlistan los valores que deben tomar los parámetros de diseño para algunos tipos de plantas de LA.

El proceso convencional presenta muchas modificaciones, cada una de ellas posee diferentes valores para los parámetros de diseño. Esto se da debido a la flexibilidad de los procesos y las diferentes ventajas que ofrece cada uno.

Tabla 2.2. Parámetros de diseño para procesos de LA.

Modificación	θ_c (d)	F/M (kg DBO/kg SSVLM.d)	Carga volumétrica (kg DBO/m ³ .d)	SSLM (mg/l)	θ (h)	Qr/Q
Convencional	5-15	0,2-0,4	0,32-0,64	1500-3000	4-8	0,25-0,75
Reactor de mezcla completa	5-15	0,2-0,6	0,80-1,92	2500-4000	3-5	0,25-1,0
Aireación modificada	0,2-0,5	1,5-5,0	1,20-2,40	200-1000	1,5-3	0,05-0,25
Aireación con alimentación escalonada	5-15	0,2-0,4	0,64-0,96	2000-3500	3-5	0,25-0,75
Contacto y estabilización	5-15	0,2-0,6	0,96-1,20	(1000-3000) ^a , (4000-10000) ^b	(0,5-1,0) ^a , (3-6) ^b	0,50-1,50
Aireación prolongada	20-30	0,05-0,15	0,16-0,40	3000-6000	18-36	0,50-1,50
Aireación de alta carga	5-10	0,4-1,5	1,60-1,60	4000-10000	2-4	1,0-5,0

^a Unidad de contacto.

^b Unidad de estabilización.

Fuente: tomado de Metcalf & Eddy, 1996.

2.5 Parámetros operacionales

Mantener un rendimiento adecuado del sistema es fundamental para la obtención de un efluente de calidad. Para ello, el proceso de LA posee ciertos parámetros operacionales que pueden modificarse para controlar la eficiencia del tratamiento.

De los principales parámetros a controlar se encuentran los siguientes:

- a. **Oxígeno disuelto en tanque de aireación:** la concentración de oxígeno en el tanque de aireación debe corresponder con la demanda establecida por los microorganismos del reactor. Una escasez del gas implica limitaciones en el crecimiento de la flora biológica e impulsa el desarrollo de organismos filamentosos. Estos organismos restan sedimentabilidad y calidad al lodo. Lo recomendable son concentraciones de oxígeno disuelto entre 1,5 y 4mg/l en todos los puntos del reactor. Comúnmente se utiliza un valor igual a 2mg/l (Metcalf & Eddy, 1996).
- b. **Relación F/M:** relaciona la carga orgánica con la cantidad de lodos en la aireación. Puede considerarse como la cantidad de energía disponible para los microorganismos, por lo que interviene en la actividad de los lodos (Winkler, 1999). Valores típicos de esta relación varían entre 0,05 y 1,0. Se define, según Metcalf & Eddy (1996), como:

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{\theta X} \quad (1)$$

Donde:

S_0 = DBO o DQO del afluente, kg/m³.

θ = tiempo de retención hidráulica del TA = V/Q, d.

V = volumen del TA, m³.

Q = caudal afluente, m³/d.

X = sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, kg/m³.

c. **Tiempo de retención celular:** refiere al tiempo que permanecen los lodos en el sistema. Es indispensable que los lodos en el sistema permanezcan como mínimo 3 días. Lodos con una edad menor a esta presentan una sedimentabilidad pobre. Tiempos medios de retención celular entre 3 y 15 días, generan efluentes estables de alta calidad y lodos con excelentes propiedades de sedimentabilidad (Metcalf & Eddy, 1996).

El tiempo de retención celular se controla mediante la purga de lodos (Horan, 1990). Cuando la actividad del lodo se ve aumentada debido a un incremento en la carga de nutrientes, la purga de lodos debe aumentarse, lo que implica una reducción en el tiempo de residencia celular (Winkler, 1999). De acuerdo con Metcalf & Eddy (1996), el tiempo de retención celular, a partir del tanque de aireación, se calcula como sigue:

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_w X_w + Q_e X_e} \quad (2)$$

Con:

θ_c = tiempo de retención celular, d.

V_r = volumen del TA, m³.

X = sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, kg/m³.

Q_w = caudal de purga de lodo, m³/d.

X_w = sólidos suspendidos volátiles en el lodo purgado, kg/m³.

Q_e = caudal efluente, m³/d.

X_e = sólidos suspendidos volátiles en el efluente, kg/m³.

d. **Producción de lodos:** refiere a la cantidad de sólidos generados, ya sea en el tanque de aireación solamente, o en el sistema completo. Este valor es importante para el diseño de los reactores biológicos y para determinar la purga de lodos del sistema. Para estimar este dato, se utiliza la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 1996):

$$P_x = Y_{obs} Q (S_0 - S) \times \left(\frac{10^3 g}{kg} \right)^{-1} \quad (3)$$

Donde:

P_x = producción diaria neta de lodos activados, medida en términos de sólidos suspendidos volátiles, kg/d.

Y_{obs} = producción de sólidos observada, kg/kg.

Q = caudal afluente, m³/d.

S_0 = DBO o DQO del afluente, kg/m³.

S = DBO o DQO del efluente, kg/m³.

Por su parte,

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + k_d \theta_c} \quad (4)$$

Con:

Y = cantidad de lodo producido por unidad de sustrato removido, kg SSLM/kg DBO.

k_d = coeficiente cinético de decaimiento, d⁻¹.

θ_c = tiempo de retención celular, d.

Las constantes Y y k_d pueden tomar valores como los muestra la siguiente tabla.

Tabla 2.3. Valores comunes de coeficientes cinéticos para aguas residuales ordinarias.

Coefficiente cinético	Valores para aguas residuales domésticas
Y (mg SSLM/mg DBO)	0,5-0,6
k_d (d ⁻¹)	0,03-0,06

Fuente: tomado de Horan (1990).

e. **Recirculación de lodos:** utilizada para mantener una concentración adecuada de lodos en el TA y permitir un tratamiento adecuado. En plantas pequeñas, la recirculación puede llevarse a cabo con base en el caudal afluente de la planta, considerando un valor de hasta el 150% del caudal ingresante. No obstante, este valor puede obtenerse mediante alguna de las siguientes técnicas (Metcalf & Eddy, 1996).

- i. *Ensayo de sedimentabilidad: el caudal de recirculación se establece de forma tal que sea aproximadamente igual (en porcentaje), a la relación entre volumen ocupado por los sólidos sedimentables del efluente del TA y el volumen del líquido sobrenadante, tras sedimentar por 30 minutos en un recipiente de 1l. Tal relación debe mantenerse sobre el 15%.*
- ii. *Ensayo de sedimentabilidad con IVL: mediante un cálculo del volumen que ocupa el lodo (de una muestra de licor mezclado obtenida a la salida del TA) después de sedimentar durante 30 minutos, dividido por la concentración de SSLM (P_w), ambos datos expresados como porcentaje, se obtiene el índice volumétrico de lodos (IVL). Conocido este dato, se calcula la relación de recirculación Q_r/Q (%): $100 \cdot Q_r/Q = 100/[100/P_w - IVL - 1]$.*
- iii. *Balance de masas en sedimentador: supone un nivel constante de lodo en el sedimentador y que la cantidad de sólidos en el efluente es despreciable. El caudal de recirculación se calcula como sigue:*

$$Q_r = \frac{XQ - X_r Q_w}{X_r - X} \quad (5)$$

Donde:

Q_r = caudal de recirculación, m^3/d .

X = sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, kg/m^3 .

Q = caudal afluente, m^3/d .

X_r = sólidos suspendidos en el lodo de recirculación, kg/m^3 .

Q_w = caudal de purgado, m^3/d .

- iv. *Balance de masas en el TA: supone que el contenido de sólidos en el afluente es despreciable en comparación con el contenido de sólidos en el licor mezclado. Para calcular el caudal de recirculación se emplea la siguiente ecuación:*

$$Q_r = Q \frac{X}{X_r - X} \quad (6)$$

- f. **Purga de lodos:** mediante el desecho del lodo en exceso en el sistema, se mantiene una relación F/M o una edad de lodos determinadas. Comúnmente se realiza la purga desde la línea de recirculación pues el lodo es más concentrado y precisa de mecanismos de bombeo de menor capacidad. Tomando en cuenta el tiempo de retención celular, que la purga se lleve a cabo desde la recirculación y suponiendo que la concentración de sólidos en el efluente es despreciable, el caudal de purga de lodos se puede calcular como sigue (Metcalf & Eddy, 1996):

$$Q_w = \frac{V_r X}{\theta_c X_r} \quad (7)$$

Con:

Q_w = caudal de purga de lodo, m³/d.

θ_c = tiempo de retención celular, d.

V_r = volumen del TA, m³.

X = sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, kg/m³.

X_r = sólidos suspendidos en el lodo de recirculación, kg/m³.

Considerando como parámetro, un valor determinado de la relación F/M, el caudal de purga se obtiene así:

$$P_x = Q_w X_r \quad (8)$$

Donde:

P_x = lodo purgado, kg/d.

Otros factores importantes como la temperatura, el pH y la alcalinidad pueden generar desestabilizaciones en el funcionamiento del sistema biológico (Metcalf & Eddy, 1996).

La temperatura por ejemplo, cuando presenta muchas variaciones, puede ocasionar modificaciones en la velocidad de las reacciones que intervienen en la depuración de los residuos líquidos. Se ha visto, como un descenso de la temperatura hacia 10°C, reduce la velocidad de las reacciones hasta la mitad.

Los pHs bajos tienden a inhibir el desarrollo de organismos participantes en la nitrificación, mientras promueven un crecimiento de organismos filamentosos.

Afluentes con baja alcalinidad presentan una baja capacidad de amortiguamiento. Debido a ello, el pH del licor mezclado puede decrecer ante la producción de dióxido de carbono (CO₂) por la respiración bacteriana.

2.6 Normativa vigente para el tratamiento de aguas residuales

En Costa Rica, el decreto N° 33601 sobre el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales establece las directrices bajo las cuales se debe reducir la contaminación en las aguas residuales para su posterior vertido o reuso. El decreto, en su artículo 20, expone los valores permisibles de los parámetros obligatorios universales de las aguas residuales que se viertan en un cuerpo receptor. Además, incluye la siguiente tabla.

Tabla 2.4. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.

Parámetro	Límite Máximo
DBO_{5,20}	50 mg/l
DQO	150 mg/l
Sólidos suspendidos	50 mg/l
Grasas/aceites	30 mg/l
Potencial hidrógeno	5 a 9
Temperatura	15°C ≤ T ≤ 40°C
Sólidos sedimentables	1 ml/l
Sustancias activas al azul de metileno	5 mg/l

Fuente: tomado de Poder Ejecutivo, 2007.

Además, en el siguiente artículo, 21, continúa con los parámetros complementarios de análisis obligatorio.

Tabla 2.5. Límites máximos permisibles para los parámetros obligatorios complementarios de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.

Parámetro	Límite Máximo
Materia flotante	Ausente
Mercurio	0,01 mg/L
Aluminio	5 mg/L
Arsénico	0,1 mg/L
Bario	5 mg/L
Boro	3 mg/L
Cadmio	0,1 mg/L
Cloro residual	1 mg/L
Color (pureza)	15%
Cromo	1,5 mg/L
Cianuro total	1 mg/L
Cianuro libre	0,1 mg/L
Cianuro libre en el cuerpo receptor, fuera del área de mezcla	0,005 mg/L
Cianuro disociable en ácido débil	0,5 mg/L
Cobre	0,5 mg/L
Plomo	0,5 mg/L
Estaño	2 mg/L
Fenoles	1 mg/L
Fosfatos	25 mg/L
Nitrógeno total	50 mg/L
Níquel	1 mg/L
Zinc	5 mg/L
Plata	1 mg/L
Selenio	0,05 mg/L
Sulfitos	1 mg/L
Sulfuros	25 mg/L
Fluoruros	10 mg/L
Hidrocarburos	10 mg/L
Sumatoria de los compuestos organofosforados	0,1 mg/L
Sumatoria de los carbamatos	0,1 mg/L
Sumatoria de los compuestos organoclorados	0,05 mg/L

Fuente: tomado de Poder Ejecutivo, 2007.

En el decreto también se incluye la frecuencia con que se deben muestrear y analizar las aguas residuales. En el artículo 34 se incluye la siguiente tabla.

Tabla 2.6. Frecuencia mínima de muestreo y análisis para aguas residuales de tipo ordinario.

PARÁMETRO	CAUDAL (m ³ /día)	
	≤ 100	> 100
Mediciones Rutinarias (1):	Mensual	Semanal
Caudal. pH. Sólidos Sedimentables. Temperatura.		
Análisis Periódicos:	Semestral	Trimestral
Caudal. Temperatura. pH. Sólidos Sedimentables. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20}). Demanda Química de Oxígeno (DQO). Grasas y Aceites (GyA). Sólidos Suspendidos Totales (SST). Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM). Coliformes fecales (CF) (cuando proceda según reglamento).		

(1) No requieren ser practicados por un laboratorio habilitado. Sin embargo, deberán estar incluidos en la Bitácora de Manejo de Aguas Residuales y en el Reporte Operacional. La forma de medir y reportar el caudal se especificará en el Procedimiento para la Elaboración del Reporte Operacional.

Fuente: tomado de Poder Ejecutivo, 2007.

El capítulo VI de este reglamento expone lo referente a los reportes operacionales. Estos documentos consisten en un análisis del desempeño del sistema de tratamiento de aguas residuales. Los reportes se presentan semestralmente si el caudal afluente es menor o igual a $100 \text{ m}^3/\text{día}$, mientras que si el caudal es mayor al mencionado, los reportes deben presentarse cada mes. Tal indicación se muestra en el artículo 46 del reglamento.

El capítulo incluye otras referencias sobre los reportes operacionales. Entre ellas, indicaciones sobre su elaboración, el contenido de este. Aparte de ello, se incluye en el Anexo 2 del reglamento, toda la demás información requerida para completar correctamente el reporte. Asimismo se incluye el formato del reporte, listo para ser completado con la información correspondiente.

El decreto incluye también, prohibiciones, y las sanciones correspondientes a quienes incumplan la normativa establecida. Con esto, se fiscaliza el vertido de aguas residuales en cuerpos receptores o alcantarillados sanitarios, y asimismo se regula el reuso de aguas residuales.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE LA PTAR TIPO

LODOS ACTIVADOS

La citada planta de tratamiento de aguas residuales del Instituto Tecnológico de Costa Rica se encuentra localizada hacia el sureste de las instalaciones académicas (Fig. 3). La planta consiste en un sistema de tratamiento biológico aerobio, modelo lodos activados con aireación extendida (Calvo, 2010).



Figura 3.1. Planta de lodos activados del ITCR.

De acuerdo con el Manual de Operación de la PTAR (Calvo, 2010), los planos y las revisiones realizadas en campo, esta se encuentra conformada por las siguientes operaciones unitarias:

1. Tratamiento primario: tamizado por rejillas. Retiene los sólidos de gran tamaño que ingresan a la planta.
2. Tratamiento biológico aerobio: reactor de lodos activados con aireación extendida. Tanque de aireación donde se da la depuración de las aguas residuales.
3. Tratamiento de clarificación: sedimentador. Clarifica el agua que sale del tanque de aireación. Permite que los sólidos sedimenten para generar un efluente libre de estos.
4. Bombeo para recirculación interna y extracción de lodos en exceso.
5. Unidad para almacenamiento, espesado y digestión de lodos. Tanque donde los lodos se estabilizan para su posterior secado.
6. Tanque de polímeros y lecho para secado de lodos. El tanque de polímeros brinda la posibilidad de generar un lodo más concentrado al separarlo del agua mediante la adición de un polímero.
Seguido a la digestión, los lodos se liberan al lecho para ser deshidratados y disminuir su volumen. Una vez secos, los lodos pueden disponerse.

La siguiente figura muestra la descripción de los diferentes componentes pertenecientes a cada etapa de la planta.

Rejillas: fabricadas en PVC, de forma circular con una apertura de 1cm. El tanque donde se encuentran posee 75cm de diámetro.

Tanque de aireación: posee un volumen de $6,28\text{m}^3$ y está dotado de un sistema de aireación extendida de mezcla completa tipo 8TRN2 marca Tsurumi. Por la acción del aireador, se genera movimiento dentro del tanque y se mantiene la mezcla y homogenización de toda la masa contenida.

Sedimentador: clarificador del tipo convencional, donde la alimentación se lleva a cabo por la parte superior. El sedimentador presenta un volumen de $1,04\text{m}^3$ y un área de sedimentación igual a $1,11\text{m}^2$. Hacia la parte superior del clarificador se encuentra una canaleta o canoa que recolecta el agua. La canoa presenta un diámetro de 15cm y un largo de 97cm. En el clarificador se encuentra una rejilla de aproximadamente un metro de alto y 97cm de largo. Esta rejilla de PVC propicia la sedimentación.

Bomba de recirculación: bomba sumergible marca MONARCH, modelo WS51M, con motor de 0,5HP. Se encuentra situada hacia el fondo del clarificador, envía los lodos sedimentados hacia el tanque de aireación si se fuese a recircular, o dado el caso, los purga hacia el digester de lodos. El bombeo se lleva a cabo mediante una tubería de 2" de diámetro. La recirculación se da para mantener la concentración de biomasa constante dentro del tanque de aireación. La purga se lleva a cabo cuando se ha superado la edad máxima de los lodos.

Digester de lodos: utilizado para el almacenamiento, espesado y digestión de los lodos purgados. Posee un volumen de $0,7\text{m}^3$ y se encuentra cubierto para evitar la emanación de gases como el metano y dióxido de carbono, producidos debido a la digestión. Dentro del tanque se encuentra una bomba (de iguales características a la de recirculación) para enviar los lodos ya digeridos hacia el tanque de adición de polímeros.

Tanque de polímeros: instalado para la adición de un floculante tipo polímero que contribuya con la separación de lodos contenidos en el agua. El tanque posee un volumen de $1,5\text{m}^3$.

Secado de lodos: la planta posee dos opciones para efectuar esto, el lecho de secado o el empleo de sacos permeables. La planta cuenta solamente con el lecho de secado, pues los sacos permeables no han sido conseguidos aún. Además, se requiere un tanque y una estructura para el escurrimiento del saco. El lecho de secado presenta forma circular, con un diámetro aproximado de 2m. El lecho consiste de láminas de PVC con orificios circulares. Las láminas se disponen sobre un lecho de arena sobre el cual permea el agua y se dirige al tanque de aireación. El lecho fue techado por el Departamento de Mantenimiento del ITCR. Para lo cual se instaló una estructura de 2m sobre el nivel del lecho y se colocaron láminas transparentes.

Figura 3.2. Componentes de la planta que intervienen en la depuración de las aguas residuales.

Fuente: Calvo, 2010 y 2010a.

Aparte de las operaciones unitarias de la planta, esta cuenta con un panel de control. Un sistema eléctrico que permite el funcionamiento del aireador y las bombas de la planta.

La figura a continuación muestra el panel de control.



Figura 3.3. Panel de control. Arriba: Carátula del panel. Abajo: Componentes del panel de control.

Las bombas presentan un control que permite variar su amperaje. Este se encuentra en el contactor correspondiente a cada bomba.

Por su parte el aireador se encuentra controlado por un variador de velocidad para motor asíncrono. Con él, se varía la frecuencia del aireador para el suministro de oxígeno disuelto. La máxima frecuencia a la que trabaja el variador de velocidad es 60Hz.

3.1 Proceso de tratamiento

El proceso de depuración de aguas residuales utilizado por la planta de LA se muestra en el siguiente diagrama.

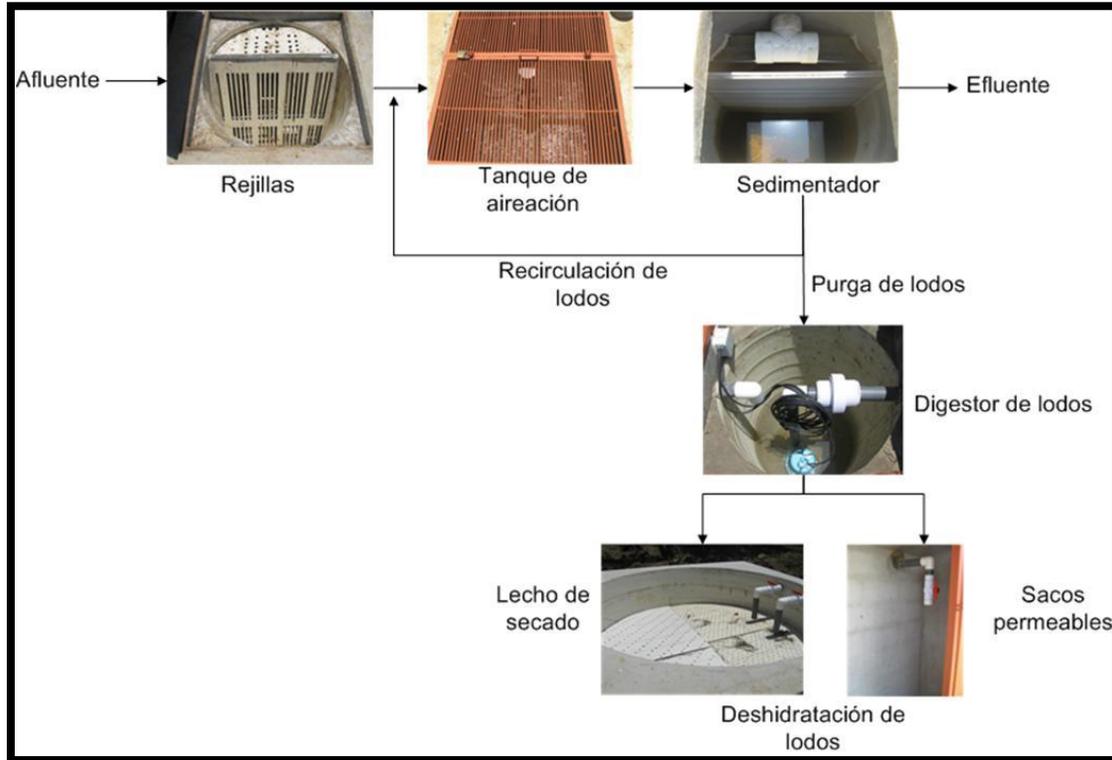


Figura 3.4. Diagrama del proceso de tratamiento de la planta de LA del ITCR.

Fuente: elaboración propia.

El proceso inicia con la desviación del agua cruda hacia la planta. Para ello, se creó un bypass que permite el ingreso de una parte del agua que alimenta la laguna de oxidación del Residencial Iztarú (Fig. 7). El agua ingresa al sistema después de ser regulado el caudal afluente (Q_a) mediante una válvula de bola de 4".



(a)

(b)

Figura 3.5. (a) Ubicación del bypass en la planta. (b) Bypass para el desvío del agua cruda hacia la planta.

Ajustado el caudal entrante, el agua residual se dirige hacia las rejillas, de donde continúa hasta el tanque de aireación. Después de 24h de permanecer en el tanque, el agua residual en forma de licor mezclado pasa hacia el sedimentador. En él, se separan los sólidos suspendidos del licor mezclado y se genera un efluente clarificado.

En caso de recirculación de lodos, estos son redirigidos hacia el tanque de aireación mediante el bombeo desde el sedimentador. Cuando se lleva a cabo la purga de lodos, estos pasan del sedimentador -mediante bombeo- hasta el digestor de lodos.

Posterior a 30 días de digestión (Calvo, 2010), los lodos pasan al tanque de polímeros y finalmente son bombeados hasta el lecho de secado. Dependiendo de las condiciones climáticas, en días soleados, los lodos pueden ser deshidratados en cuestión de 48h o menos.

Con esto, el proceso de tratamiento finaliza, obteniendo un efluente depurado y lodos estabilizados y deshidratados.

3.2 Criterios de diseño de la planta

Según Calvo (2010a), la planta de lodos activados del ITCR se encuentra diseñada para tratar aguas residuales con las siguientes características:

Tabla 3.1. Características del agua residual a tratar por la planta.

Parámetro	Valor máximo
DQO	500mg/l
DBO ₅	300mg/l
Sólidos Suspendidos Totales	300mg/l
GyA	50mg/l
SAAM	10mg/l
pH	6-9
T	15-35°C
Qa máximo	5m ³ /d ≈ 0,06l/s

Fuente: Calvo, 2010a.

Además, la planta se encuentra diseñada para tratar una carga orgánica de 1,5kg DBO/día.

3.3 Parámetros operacionales de la planta

De acuerdo con la memoria de cálculo de la planta, esta opera según los siguientes parámetros.

Tabla 3.2. Características de la planta de lodos activados.

Característica	Valor
Volumen total del tanque de aireación	6,28m ³
Tiempo de retención celular	23d
Tasa de recirculación de lodos	16%
Tiempo de retención hidráulica	30,1h
Requerimiento de oxígeno	1,7kg/d
F/M	0,22d ⁻¹
Carga volumétrica	0,24kg DBO/m ³

Fuente: Calvo, 2010a.

De trabajar con los valores indicados anteriormente, el sistema será capaz de generar un efluente con las siguientes características.

Tabla 3.3. Propiedades del efluente generado por la planta de lodos activados.

Parámetro	Valor máximo
DQO	150mg/l
DBO ₅	50mg/l
Sólidos Suspendidos Totales	50mg/l
GyA	30mg/l
pH	5-9
T	15-40°C
SSed	1ml/l
SAAM	5mg/l
Nemátodos intestinales	1 Huevo/l
Coliformes fecales	1000 NMP/100ml

Fuente: Calvo, 2010a.

3.4 Lodos activados con aireación extendida

La aireación extendida corresponde a una modificación del proceso convencional de lodos activados. Esta modificación se emplea para el diseño de plantas pequeñas. La aireación extendida es ampliamente utilizada en hogares y pequeñas comunidades.

Este tipo de plantas presenta ventajas como la generación de un efluente de alta calidad, con bajo contenido orgánico, la producción de sólidos biológicos es baja, y el lodo se estabiliza muy bien. Asimismo, su diseño y operación son relativamente sencillos, en comparación con otras modificaciones del proceso convencional (Metcalf & Eddy, 2003).

Con la aireación extendida, el sistema es capaz de tratar cargas tóxicas y resistir choques o impactos altos de carga orgánica. El sistema también puede tratar compuestos orgánicos de difícil degradación que ocupan altos tiempos de retención celular (Eckenfelder, 1998). No obstante, para lograr esto, el sistema requiere de altos suministros de energía para la aireación (Metcalf & Eddy, 2003).

Entre los parámetros de diseño para este tipo de sistemas, se pueden encontrar los siguientes.

Tabla 3.4. Parámetros de diseño para una planta de lodos activados con aireación extendida.

Tipo de reactor	θ_c (d)	F/M (kg DBO/kg SSVLM.d)	Carga volumétrica (kg DBO/m ³ .d)	SSLM (mg/l)	Tiempo de retención hidráulica (h)	Relación de recirculación (Qr/Qa)
Mezcla completa o flujo pistón	20-40	0,04-0,15	0,1-0,3	2000-5000	18-30	50-150

Fuente: Metcalf & Eddy (2003) y Eckenfelder (1998).

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

Con el fin de desarrollar las diferentes actividades del proyecto, a continuación se enuncia la metodología adoptada por actividad.

4.1 Puesta en marcha de la planta

Para arrancar la planta se realizó primeramente una prueba hidrostática. En ella, se requería verificar que la planta no presentará fugas en ninguna de las estructuras que conforman la planta.

Para probar esto, se llenó la planta de tratamiento con agua potable y se observó la hidráulica en las distintas operaciones unitarias. La figura a continuación muestra la introducción del agua potable en la planta.



Figura 4.1. Prueba hidrostática, llenado con agua potable de la planta de lodos activados.

Posterior a ello, se inoculó el tanque de aireación con lodo proveniente de la segunda laguna de oxidación del ITCR. Se empleó un volumen de 628 l de lodo, equivalentes a un 10% del volumen del tanque de aireación (Fig. 9). Con esto realizado, se encendió el aireador y la recirculación de lodos. Después de quince días de inoculado el sistema, se inició una alimentación gradual de la planta con agua cruda.



Figura 4.2. Lodo inóculo, proveniente de la segunda laguna de oxidación del ITCR.

La alimentación se dio en tres semanas, de manera que se culminara con el caudal afluente máximo de diseño ($5\text{m}^3/\text{d}$). La tabla a continuación muestra los caudales utilizados durante la alimentación.

Tabla 4.1. Variación del caudal afluente (Q_a) durante la alimentación del sistema con agua residual.

Semana	Q_a (m^3/d)	Q_a (l/s)	Porcentaje (%) de aumento con base en el Q_{max} ($5\text{m}^3/\text{d}$)
1 set – 5 set	1,25	0,01447	25
6 set – 12 set	2,5	0,02894	50
13 set – 19 set	5	0,05787	100

4.2 Probar combinaciones de parámetros para el arranque de la planta

Con el fin de llevar a cabo esta actividad, se definieron tres parámetros a monitorear:

- a. Relación F/M.
- b. Caudal de recirculación.
- c. Edad de lodos y tiempo de retención celular.

Durante dos semanas se variaron los últimos dos parámetros y mediante análisis de DBO y SSVLM, se conoció su incidencia en la variación del F/M. Con ello, se conoció además la eficiencia con la que se desenvolvía el sistema.

4.3 Caracterizar afluente

Para desarrollar esta actividad se muestreó el agua residual entrante a la planta durante ocho semanas.

Se realizaron muestreos compuestos del afluente para analizar DBO, DQO, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, pH, temperatura, sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y Grasas y Aceites (GyA).

Para el muestreo se recolectaron volúmenes de 100ml de afluente cada media hora. Cada día de la semana se muestrearon horarios distintos. La tabla a continuación muestra las horas muestreadas.

Tabla 4.2. Muestreo compuesto del afluente.

Semana	Horario de muestreo durante cada día de la semana					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	
1	7:30am-10:30am					
2		9:30am- 12:00pm		1:30pm- 4:30pm		
3			8:00am- 11:00am		9:00am- 12:00pm	
4	11:00am-1:00pm					
5	7:30am-9:00am					
6		1:00pm- 4:00pm		8:00am- 11:00am		
7			1:00pm- 4:00pm		2:00pm- 4:30pm	
8	2:00pm-4:30pm				7:30am-8:30am	

Además de los muestreos, se midió el caudal entrante a la planta y el caudal de recirculación. Para ello, se empleó un recipiente de plástico aforado y se midió en cuanto tiempo se llenaba el recipiente hasta el aforo.

La siguiente tabla expone los requerimientos para el análisis fisicoquímico de muestras.

Tabla 4.3. Requerimientos para análisis fisicoquímicos de muestras.

Parámetro	Recipiente	Volumen (ml)	Preservación	Tiempo Máximo
DBO5	Plástico	250	Congelar/ refrigerar	48 horas
DQO	Plástico	100	H ₂ SO ₄ (pH menor a 2).	28 días
Aceites y Grasas	Vidrio de Boca Ancha	1000	HCl 1+1 o concentrado (pH menor a 2).	28 días
Ssusp.	Plástico	250	Refrigerar	7 días
Ssed.	Plástico	1000	Refrigerar	7 días
pH	Plástico	250	Lectura <i>in situ</i>	2 horas
Nitratos	Plástico	250	HCl 1+1 o conc. (pH menor a 2).	7 días
Sulfatos	Plástico	1000	Refrigerar	7 días
Metales y dureza	Plástico	500	HNO ₃ conc. (pH menor a 2).	28 días
Otros: fisicoquímicos	Plástico	1000	Refrigerar	7 días

Fuente: Marco Méndez López, asistente de CEQIATEC.

4.4 Caracterizar el funcionamiento óptimo de la planta

Con las pruebas de parámetros, se determinaron los factores que alteran la estabilidad del sistema de manera tal que se controlen. Basándose en esos parámetros, se evaluó su incidencia en el sistema, se analizaron y se determinó cómo operar la planta para un funcionamiento óptimo.

4.5 Verificación del funcionamiento y eficiencia de los procesos

Conocida la operación correcta de la planta, se verificó su eficiencia para compararla con el diseño y lo construido.

De tal manera, se manejaron los parámetros que alteraban el sistema y se modificaron para ver su incidencia. Con ello, se controló la aireación, se cambió la frecuencia del variador para ver su efecto sobre el oxígeno disuelto. Asimismo se observaron regulaciones en el caudal de recirculación y la purga de lodos.

4.6 Elaborar un diagnóstico sobre la eficiencia del tratamiento de aguas y comparar la eficiencia práctica con la teórica

Comparados el funcionamiento y las eficiencias establecidas, se generó un diagnóstico donde se delimitaran las similitudes o diferencias entre el funcionamiento práctico y el teórico.

Se revisó el Manual de Operación y la Memoria de Cálculo de la planta. Para observar los datos incluidos y corroborar la realidad de la planta. Conocer si la información es verídica y enlistar las diferencias.

De forma puntual se asignaron los puntos críticos que alteran el funcionamiento de la planta.

4.7 Caracterizar efluente

Para obtener la composición fisicoquímica del efluente generado por la planta, se muestreo durante 3 semanas, y se analizaron los parámetros de carácter obligatorio establecidos por la normativa.

Los muestreos fueron compuestos, y siguieron los mismos procedimientos que los empleados para la caracterización del afluente.

4.8 Caracterizar desechos, clasificarlos

Para la caracterización de los desechos, se midió la densidad de los lodos dirigidos al lecho de secado. Para ello se tomó una alícuota de 30ml del lodo y mediante una balanza analítica se midió su masa. Con estos datos se realizó el cálculo de la densidad.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (9)$$

Donde:

ρ = densidad, g/ml.

m = masa, g.

v = volumen, ml.

Además, con el fin de conocer sus propiedades para posibles usos, se midió su concentración de nitrógeno orgánico y amoniacal mediante el *método de Kjeldahl*. Asimismo se determinó la cantidad de fósforo con el *método colorimétrico de ácido Vanadomolibdofosfórico* del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Aparte de ello, se determinó la cantidad de coliformes fecales presentes mediante Número Más Probable (NMP). Se empleó para ello una muestra de 10ml de lodo proveniente del digestor.

4.9 Búsqueda y aplicación de alternativas de aprovechamiento, uso y disposición

Revisión bibliográfica sobre posibles usos de lodos provenientes de PTAR, para identificar los principales usos y así determinar cuales pueden ser aplicados al lodo residual obtenido en la planta.

Asignar un posible uso al lodo residual, de acuerdo con su composición, obtenida en la actividad de caracterización del lodo.

4.10 Capacitar a los administradores de la planta sobre el funcionamiento de la planta

Para la capacitación, se prestará una exposición que coincida con la defensa del proyecto de graduación. En la exposición se presentarán los puntos correspondientes al funcionamiento adecuado de PTAR tipo lodos activados. Para ello se contará con la presencia de los administradores de la planta y algunos de los posibles usuarios.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La ejecución de las actividades propuestas, produjo los siguientes resultados.

5.1 Poner en marcha la planta

Con la prueba hidrostática se verificó que la planta no presenta fugas en el tanque de aireación y tampoco en las otras unidades del tratamiento. El agua fluye correctamente a través del sistema.

Por su parte, la inoculación permitió obtener una flora microbiana adecuada. Con esto, se aceleró el proceso microbiano en la planta, promoviendo una mejor adaptación de los microorganismos. El agua adquirió un color café oscuro, con presencia de espuma en diferentes tonalidades de color café (Fig. 9). La espuma fue desapareciendo con la alimentación gradual del agua cruda.



Figura 5.1. Espuma en el tanque de aireación.

Para el inóculo, fue importante utilizar lodos estabilizados en otro tratamiento de aguas residuales, cuyas características sean similares, sino iguales (Eckenfelder, 1998). Esto permite que la biomasa se adapte más fácil y rápidamente. Por ello, se escogió el lodo de la laguna de oxidación del ITCR.

La entrada de agua residual al sistema, mejoró la calidad microbiana y facilitó la adaptación de las bacterias. La aclimatación se dio en poco tiempo, tomando en cuenta que tal proceso puede tardar desde días, hasta 5 ó 6 semanas (Eckenfelder, 1998). Para un mes después del inicio de la entrada de agua residual, la formación de lodos fue óptima, así como la forma y color de los flóculos.

El flóculo ya tenía estructura más gruesa y un tamaño mayor. Hacia el inicio del arranque, los flóculos poseían un tamaño similar a cabezas de alfiler, mientras que con el avance del tiempo, este tamaño creció hasta encontrarse flóculos con diámetros aproximados de 5cm.

Con la alimentación gradual del sistema, el lodo pasa por un proceso de adaptación. De forma tal que no se le somete a un impacto repentino en carga orgánica. Al seguir un aumento moderado de carga orgánica, los microorganismos en el lodo van asimilando los nutrientes y se van preparando para alcanzar un metabolismo adecuado para el tratamiento del agua y las condiciones de diseño de la planta.

El ingreso de $5\text{m}^3/\text{d}$ de agua residual, permitió al sistema llegar más rápido a su estabilización. Con una entrada mayor de carga orgánica, los lodos de la planta aumentaron y alcanzaron una consistencia apta para la depuración del agua cruda. Este caudal máximo ($5\text{m}^3/\text{d}$) aumenta además, la mezcla en el sistema. Y junto con la recirculación, mejora el arrastre lodos y la incorporación de oxígeno.

5.2 Probar combinaciones de parámetros para el arranque de la planta

La combinación de parámetros produjo los siguientes resultados:

Tabla 5.1. Resultados obtenidos durante la combinación de parámetros.

Parámetros modificados	Valores definidos	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente (mg/l)	SSVLM (mg/l)	SSed (ml/l)	Eficiencia (%) ^a	F/M (d ⁻¹)
Qr, θ	$1,245\text{m}^3/\text{d}$, 50-60d	127,05	25,4	357	55	80	0,28
Qr, θ	$2,5\text{ m}^3/\text{d}$, 50- 60d	141,2	25,15	485	59	82	0,23

^a Eficiencia basada en la remoción de DBO.

La eficiencia de la planta no presenta alteraciones importantes con la recirculación. Al emplear un Qr basado en el Qa, el sistema puede funcionar adecuadamente. Aún así, pueden utilizarse caudales de recirculación basados en la capacidad de la válvula. Inclusive, la recirculación puede darse periódicamente.

Se observó que cuando la recirculación no se lleva a cabo y además la purga de lodos no se ha realizado en periodos mayores a 25 días, a la superficie del sedimentador ascienden lodos y flóculos de estos. Debido a la falta de purga y recirculación, se generan condiciones anaeróbicas en las cuales se producen gases y se favorece el crecimiento de organismos filamentosos.

Cuando el lodo contiene nitritos o nitratos, los microorganismos pueden utilizar estos compuestos como sustituto del oxígeno. Ante tal reemplazo, se genera una reducción de esos compuestos nitrogenados hacia nitrógeno gaseoso y óxido nitroso. Cuando se lleva a cabo este proceso reductivo, las burbujas de gas producidas quedan atrapadas entre los lodos y los flóculos y ocasionan que estos asciendan a la superficie (Winkler, 1999).

Cuanto más prolongado el periodo de permanencia de los lodos en el sedimentador, es decir sin recircularlo o purgarlo, mayor la promoción de condiciones anaerobias. Esto da como resultado la descomposición anaerobia de los lodos y la consecuente producción de malos olores.

Los procesos descritos anteriormente, se incrementan cuanto mayor sea la edad de los lodos en el sistema. De acuerdo con la Memoria de Cálculo de la Planta, los lodos poseen una retención celular de 23 días aproximadamente (Calvo, 2010a). Lo que quiere decir, que la purga debe realizarse basándose en este tiempo. Aún así, pueden inclusive pasar 30 días, para que los lodos circulen por el sistema. Según Horan (1990), lodos con tiempos de retención menores a 3 días presentan mala sedimentabilidad, mientras que lodos muy viejos, con edades mayores a los 30 días equivalen a problemas en la formación de flóculos y en la depuración del agua residual.

Asimismo se vio como el aumento en la recirculación aumentó la concentración de SSVLM. Esto se da pues la recirculación continuamente adiciona sólidos suspendidos al tanque de aireación. Además, va renovando la flora microbiana al estar cambiando constantemente los lodos presentes en el reactor.

Cuando la recirculación se disminuye, la cantidad de SSVLM disminuye como parte de la depuración del agua residual, así como debido a los ciclos de vida de los microorganismos. Con la disminución en la recirculación se reduce también la eficiencia del sistema, como respuesta a la cadena de interacciones entre los lodos y el agua residual. Es decir, así como disminuye la concentración de SSVLM, la depuración se reduce por la falta de masa biológica en el reactor.

Los resultados indican que la relación F/M se encuentra alrededor de 0,255 (promedio entre 0,23 y 0,28). De acuerdo con los parámetros de diseño según Calvo (2010a), esta relación debe ser de 0,22. Esto quiere decir que el valor con el que trabajó la planta durante las observaciones se mantuvo cercano al valor de diseño. Lo que además indica una proporción adecuada entre la masa biológica en el reactor y la carga orgánica que ingresa al sistema.

Asumiendo que la carga orgánica en el afluente se mantiene constante, esta relación se puede disminuir al aumentar la recirculación de lodos hacia el TA. Con un incremento en la concentración de SSVLM, la relación se disminuye y se puede ejercer así un control, para mantener una relación F/M estable. Así se ve con los datos, que con el aumento del Q_r , el valor de F/M disminuyó: de 0,28 a $0,23d^{-1}$. Una diferencia pequeña, pero que a nivel de eficiencia puede ejercer un cambio significativo.

5.3 Caracterizar afluente

En las muestras recolectadas de forma compuesta, se obtuvieron los siguientes valores.

Tabla 5.2. Caracterización del caudal afluente* .

Día	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	SS (mg/l)	SSed (ml/l)	GyA (mg/l)	SAAM (mg/l)	pH	Temperatura (°C)
Lunes	127	389	0,13	3,5	0,082	6,5	7,5	23
Martes	150	468	0,11	4,00	0,102	6,0	7,2	21
Miércoles	141	460	0,12	4,25	1,038	7,0	7,3	22
Jueves	154	370	0,17	3,25	0,165	7,5	7,4	23
Viernes	170	552	0,15	3,75	0,945	7,0	7,8	22

*Muestras realizadas con la válvula regulada en 5m³/d.

Con base en estos valores puede determinarse una caracterización del afluente a la planta. De tal forma, que se conozca la composición fisicoquímica con que ingresa esta agua. Por tanto, se puede realizar el siguiente análisis.

Tabla 5.3. Valores promedios de las características del agua cruda.

Parámetro	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	SS (mg/l)	SSed (ml/l)	GyA (mg/l)	SAAM (mg/l)	pH	Temperatura (°C)
Promedio	148	448	0,136	3,75	0,466	6,8	7,4	22,2

Conocer las propiedades con que ingresa el agua cruda a la planta permite determinar el grado de eficiencia con que trabaja el sistema. Además, es importante para controlar la carga orgánica que ingresa, pues esto puede desestabilizar el sistema. El agua cruda puede incorporar al proceso elementos tóxicos que ponen en riesgo la masa biológica.

A la planta no ingresan altas concentraciones de DBO, aunque sí de DQO. Esto indica que la cantidad de sustancias químicamente oxidables que entran con el agua cruda es mayor que la cantidad de sustancias que pueden ser desdobladas por microorganismos. Así, ingresaron concentraciones de DBO entre 127 y 170mg/l, como entre 370 y 552mg/l de DQO. Valores que la planta puede tratar adecuadamente en condiciones óptimas de funcionamiento.

Parámetros como la temperatura y el pH pueden alterar el funcionamiento de la depuración, al alterar el rendimiento de los microorganismos en el tanque de aireación. Como se vio, temperaturas cercanas a los 10°C reducen a la mitad las velocidades de reacción en el congregado biológico. Anotar que, el funcionamiento óptimo de los sistemas biológicos ocurre en las temperaturas donde el metabolismo bacteriano alcanza su cúspide. Donde el crecimiento y reproducción son las más altas, sucesos que se dan entre temperaturas de 25°C a 35°C (Metcalf & Eddy, 2003).

La temperatura además se encuentra relacionada con la incorporación de gases en el agua. Por ejemplo el oxígeno, que en bajas temperaturas logra disolverse mejor en el agua. No obstante, es importante la presencia de un equilibrio entre temperatura y velocidades de reacción, puesto que altos metabolismos bacterianos pueden incidir en la concentración de oxígeno (Metcalf & Eddy, 2003). Para ello, los sistemas de aireación y agitación suplen tal balance.

La temperatura del agua cruda se mantuvo entre los 21 y 23°C durante las observaciones. Valores relativamente similares a lo largo de la semana. Aun así, los días calurosos y las noches frías, pudieron variar tales valores en el agua residual.

El pH presentó poca variación durante los muestreos. En casi todas las mediciones los valores se encontraron cercanos a las 7 unidades de pH. Esto otorga a las aguas un notable grado de neutralidad, así como elimina riesgos para la viabilidad microbiana, pues pH menores a 6 o mayores a 9 dificultan la existencia biológica (Metcalf & Eddy, 2003).

Por su parte, los valores de SAAM entre los 6,0 y 7,5mg/l indican una baja concentración de sustancias como detergentes. Esto constituye un buen indicador de toxicidad, pues tales tensoactivos se degradan hacia fenoles y algunos disruptores endocrinos, de forma que al entrar en la planta bajas cantidades, la concentración de esos productos de degradación será mínima. Además, que no representarán algún riesgo para el medio acuático hacia el cual se descarga el efluente de la planta. Por otro lado, esto disminuye la cantidad de espumas que se generarían dentro del TA y el sedimentador.

En cuanto a las grasas y aceites, el agua cruda incorpora muy bajas cantidades de estas. Esto representa una ventaja para el sistema pues estas sustancias son de compleja degradación. Ello, al no disolverse en el agua y no estar, consecuentemente, disponibles para los microorganismos (Metcalf & Eddy, 2003). Por tanto, las concentraciones entre 0,082 y 1,038mg/l de grasas y aceites no presentan problemas en la depuración.

Las figuras a continuación exponen el comportamiento de los distintos parámetros a lo largo del tiempo de muestreo. Los días de la semana muestreados corresponden a los números del 1 al 5, desde lunes hasta viernes, donde el lunes es 1 y viernes 5.

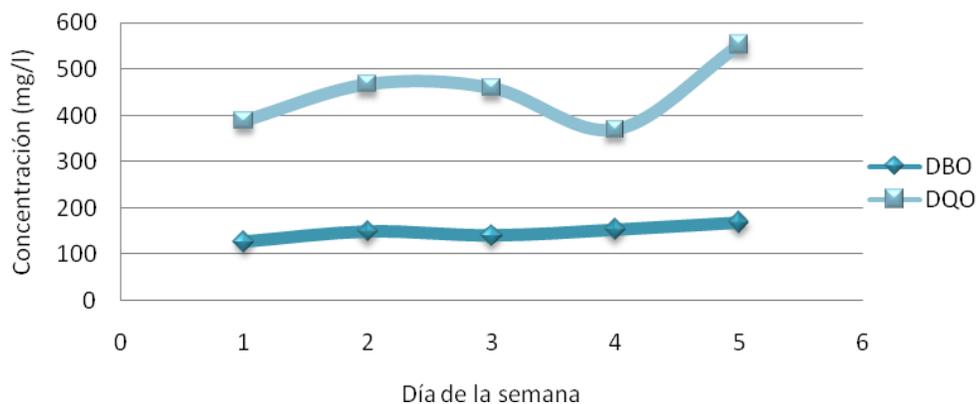


Figura 5.2. Variación de la DBO y DQO entre lunes y viernes en el Qa.

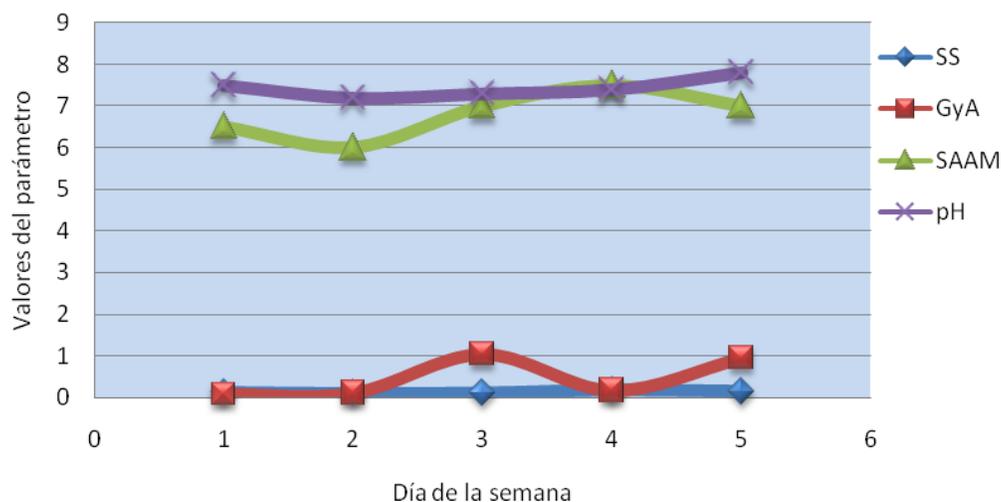


Figura 5.3. Comportamiento de distintos parámetros del agua cruda durante la semana.

Puede observarse como los parámetros permanecen relativamente constantes a lo largo de los días muestreados. Donde la variante refiere a la precisión de los datos en cada parámetro. Es decir, la proporcionalidad entre los valores de cada parámetro es diferente.

Revisándose la memoria de cálculo (Calvo, 2010a), puede notarse como difieren los valores que puede tratar la planta respecto del agua residual ingresante. El agua cruda presenta concentraciones de los distintos parámetros muy por debajo de las concentraciones de diseño. Esto implica que el sistema no trabajará bajo tanta presión, y permitirá que pueda darse una adaptación prolongada hacia la recepción de aguas con mayor contaminación. Es decir, la vida útil de la planta será más larga.

La calidad de las aguas residuales es específica para la población que las genera, así como de las actividades en la región. Sin embargo, pueden obtenerse promedios para la caracterización de estos desechos líquidos. La siguiente tabla presenta la composición fisicoquímica habitual que presentan las aguas residuales domésticas.

Tabla 5.4. Composición fisicoquímica típica de aguas residuales domésticas.

Parámetro	Concentración		
	Baja	Media	Fuerte
Sólidos totales (mg/l)	390	720	1230
SS (mg/l)	120	210	400
SSed (ml/l)	5	10	20
DBO₅ (mg/l)	110	190	350
DQO (mg/l)	250	430	800
GyA (mg/l)	50	90	100

Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2003).

Comparando los valores anteriores con la composición del agua residual que alimenta la planta de lodos activados, puede clasificarse la concentración del agua como media. Esto, tomando como base los promedios de DBO y DQO. Aunque si se considera el agua cruda antes de pasar por la válvula, los demás parámetros también se ubican alrededor de las concentraciones intermedias.

5.4. Caracterizar el funcionamiento óptimo de la planta

La calidad del efluente generado por el proceso de LA depende, según Horan (1990), principalmente de factores como:

- Variaciones en la DBO y en la concentración de sólidos suspendidos, así como en el caudal de ingreso.
- Variaciones en la edad de los lodos, relación F/M, razón de recirculación, sólidos en el licor mezclado, en la recirculación y en la purga.
- Modificaciones en el suministro de oxígeno.
- Características de sedimentación del lodo.
- Factores ambientales como el viento y la temperatura.

Estos y otros factores son de gran importancia para la planta del ITCR. El diseño de la planta fue establecido de acuerdo con los parámetros mencionados anteriormente. No

obstante, varios componentes de la planta de lodos activados presentan dimensiones mayores a las requeridas para funcionar con esos parámetros de diseño.

Las *tuberías instaladas* se encuentran sobredimensionadas para el tipo de sistema diseñado. Esto repercute en la eficiencia del sistema por cuanto tienden a producir obstrucciones frecuentes en las válvulas, de manera que el sistema no puede funcionar continuamente si no es por la revisión diaria de la planta.

El sistema se encuentra diseñado para recibir $5m^3$ *diarios* (0,06 l/s). Sin embargo, la válvula en su máxima apertura, permite el ingreso de $61m^3/d$ (0,7 l/s). Esto supone que para regular el caudal ingresante a la planta, la válvula debe ser abierta a un mínimo de su capacidad, aproximadamente un 8%.

El agua residual trae consigo una alta concentración de sólidos gruesos. Para que el agua cruda ingrese al sistema, debe respetarse el caudal de diseño. De manera tal que como las tuberías están sobredimensionadas, debe regularse el caudal afluente, lo que origina un pequeño orificio por el cual debe entrar el residuo líquido al sistema.

En el ingreso, todos los sólidos y demás componentes que presenta el agua residual son retenidos en la pequeña abertura de la válvula, de forma que continuamente se obstruye.

Para esto, es importante la colocación de un cedazo en el bypass donde se desvía el agua cruda que ingresa a la planta. Con este cedazo, se impone un pretratamiento al agua residual de manera tal que la obstrucción de la válvula inicial sea menor.

Las observaciones permitieron conocer que sin el cedazo en el bypass de entrada, la obstrucción de la válvula inicial se completa en un periodo entre 12 y 16 horas. Por lo que si se regula temprano en la mañana el caudal, para horas de la noche no estaría ingresando agua cruda al sistema.

Cuando se ha colocado el cedazo, previo a la entrada del agua residual, la obstrucción de la válvula de entrada tarda hasta 3 días.

El no regular la válvula para el ingreso del caudal de diseño presenta consecuencias como:

- a. Ingreso de un alto contenido de materia orgánica.
- b. Alteración de la hidráulica del sistema puesto que ingresa un volumen de agua mayor que el establecido en el diseño. El sistema posee un volumen establecido, y el ingreso de un volumen mayor puede comprometer las estructuras.
- c. Disminución de la eficiencia del sistema pues al ingresar un volumen de agua mayor al establecido, se diluyen los lodos y no se permite una correcta depuración ni sedimentación. De manera que el efluente no cumpliría con las normas correspondientes.

Asimismo; la **tubería de recirculación** debe revisarse diariamente. Debido a la misma situación del sobredimensionamiento, al regular la válvula para ajustar el Q_r , los lodos quedan atascados en el diminuto espacio que se crea en la válvula. Este hecho cobra aún más importancia pues el Q_r constituye un porcentaje del Q_a , lo que implica aperturas de la válvula menores a las de la válvula del Q_a . Aunado al hecho que la bomba trabaja sobre su capacidad y disminuye su vida útil.

Cuando sucede esto y no se corrige la situación, la bomba continúa trabajando. Con el paso de los días, esto genera que el motor vaya aumentando su temperatura debido a la rotación. Ante el trabajo continuo de la bomba, el tanque donde se almacenan los lodos para el recirculado comienza a subir su temperatura también, los lodos se calientan y se genera una especie de “olla” donde los lodos y el agua dentro pueden llegar a hervir. Esto pone en riesgo la flora microbiana y por ende la eficiencia del sistema.

Estas dos situaciones pueden solucionarse mediante una supervisión diaria del sistema. Para desobstruir ambas válvulas, estas deben abrirse completamente para que pase todo el material y se limpie la tubería. Una vez efectuado esto, pueden volver a regularse los caudales.

Esta solución presenta el inconveniente, por lo menos en el caso de la válvula del Q_a , que genera a la flora microbiana un impacto de materia orgánica. Para la recirculación, desestabiliza el Q_r y genera mucho movimiento y mezcla en el Tanque de Aireación (TA).

Además, reduce el nivel de agua en el sedimentador y al regularse el Q_r aumenta bruscamente el nivel de agua en él. Por tanto, el agua proveniente del TA no posee tiempo de sedimentar y pasa directamente hacia el efluente. Debido a esto, el efluente pierde su calidad de vertido pues constituye un fluido con un contenido de sólidos superior al establecido por la norma.

Por su parte, las *rejillas* poseen aberturas muy anchas que debido al tipo de agua residual que alimenta el sistema y por las tuberías previas, no ejercen función alguna puesto que los sólidos de gran tamaño son retenidos a lo largo del complejo de tuberías.

El *sedimentador* es alimentado por arriba. En caso que se alimentara por debajo, se aumentaría la eficiencia de la sedimentación y se evitaría que el efluente saliera del sistema cargado con lodos cuando la recirculación esté al 100%.

En otro ámbito, la *aireación* constituye un factor de sumo cuidado. Una concentración adecuada de oxígeno es indispensable para mantener activa la flora microbiana. Asimismo es requerido un equilibrio del nivel de oxígeno en el TA, para evitar desperdicios energéticos.

Además, debe cuidarse la *composición fisicoquímica del afluente*. Si bien es cierto que las composiciones del afluente varían vagamente con el tiempo, sí es importante monitorear periódicamente el sistema en búsqueda de desequilibrios inusuales. En caso de encontrar alguno de ellos, por ejemplo variación en el color del lodo o algún cambio drástico del olor, se puede examinar la composición fisicoquímica del agua entrante para constatar la presencia de algún agente depredador del sistema microbiano.

Parte fundamental del proceso consiste en la *edad de los lodos*. Las observaciones efectuadas permitieron conocer que los lodos con edades mayores a los 30 días comienzan a perder la sedimentabilidad. Por tanto, para mantener flóculos de buena calidad, es importante llevar a cabo las purgas en los tiempos requeridos. Con esto, el tratamiento permanece eficiente.

Tal como muestra la siguiente figura, cuanto mayor sea la edad de lodos, menor será la sedimentabilidad de ellos. Los lodos deben permanecer por lo menos una semana en el sistema para que alcancen un asentamiento adecuado que brinde un efluente claro. Y es precisamente en las plantas de lodos activados con aireación extendida, donde edades de lodos muy altas implican una sedimentabilidad cercana a cero.

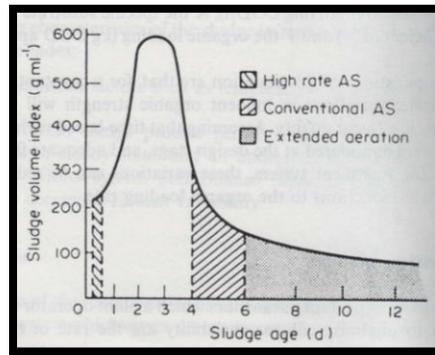


Figura 5.4. Influencia de la edad de los lodos en la sedimentabilidad de estos.

Fuente: Horan, 1990.

Dada la edad de lodos, cobra importancia controlar la **purga de lodos**. Una purga de lodos excesiva y temprana puede reducir la cantidad de flora microbiana viable en el sistema. Un lodo con una edad mayor a 45 días se encuentra listo para purgarse. No se debe purgar todo el lodo, puesto que eliminaría la capacidad de depuración del sistema. La purga debe realizarse con base en la cantidad de lodos producidos diariamente. De tal manera, se mantiene el sistema en equilibrio. Lo primordial es purgar los lodos de forma intermitente en lugar de forma continua (Winkler, 1999).

5.5 Verificación del funcionamiento y eficiencia de los procesos

El funcionamiento óptimo de la planta de lodos activados del ITCR requiere del manejo de varios factores. Bien se mencionaron previamente, por tanto, es necesario verificar su verdadera incidencia en el sistema.

- a. **Nivel de Oxígeno Disuelto (OD) en el TA:** la parte principal del proceso, pues de la aireación correcta depende la viabilidad de los microorganismos en el reactor.

La aireación es controlada mediante el variador de frecuencia en el panel de control. Suministrar la potencia necesaria para satisfacer la demanda de oxígeno en el TA debe significar una depuración eficiente del agua residual. El gráfico presente en la siguiente figura muestra como la aireación aumenta conforme incrementa la frecuencia del aireador.

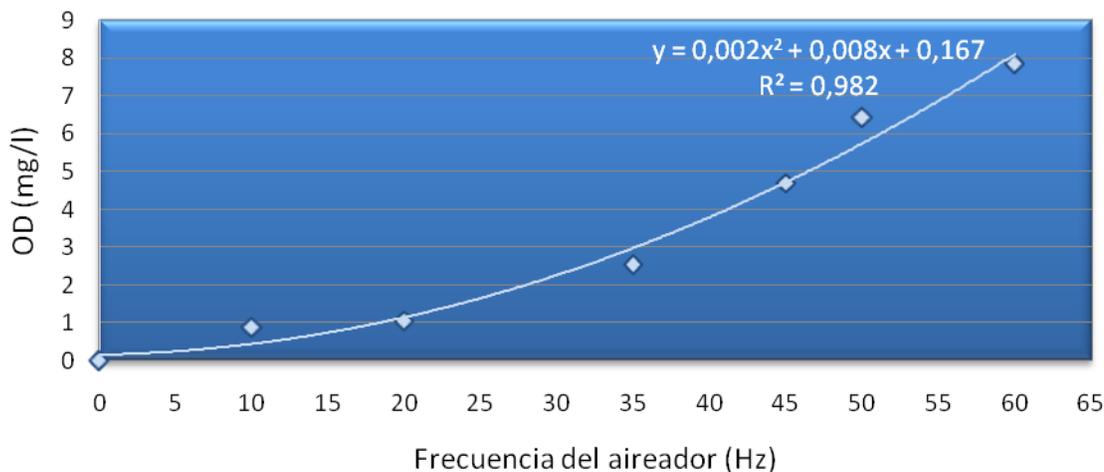


Figura 5.5. Comportamiento del oxígeno disuelto en el TA respecto de la frecuencia del aireador.

Se expone además, como se da una relación polinomial entre la frecuencia del aireador y el OD en el TA. Con un coeficiente de relación de un 98%. Se ve así como el aireador puede suministrar niveles de OD hasta casi 8mg/l. Con este ámbito, se puede trabajar con diferentes provisiones de OD. Aún más, se puede variar el nivel de mezcla en el TA, ocurrido gracias a la oxigenación del reactor.

Así como con la frecuencia varía la concentración de oxígeno en el tanque de aireación, también cambia la agitación en el tanque. Tomando como base la oxigenación del reactor, se pueden observar tres diferentes regímenes de agitación. Hasta los 20Hz, el aireador provee una mezcla nula. Esto ocasiona que el TA presente niveles de oxígeno disuelto cercanos a 0mg/l. Debido también a la mala agitación, los sólidos suspendidos en el licor mezclado tienden a sedimentar. Esto origina que el agua residual no se trate, al no entrar en contacto con los lodos del sistema.

También es importante anotar que estas concentraciones bajas de OD promueven el crecimiento de microorganismos como las bacterias filamentosas. Estas bacterias empobrecen la calidad de lodos, y les resta sedimentabilidad (Metcalf & Eddy, 1996).

Pasados los 20Hz y hasta los 40Hz, el TA recibe una aireación mínima. La mezcla que genera esta frecuencia es suficiente para mantener el licor mezclado en suspensión. No obstante, con el tiempo y el aumento en la cantidad de lodos en el sistema, el aireador se va saturando con lodos y la aireación tanto como la agitación disminuyen significativamente. Por lo que los niveles de oxígeno disuelto pueden reducirse por debajo de 1,5mg/l.

A pesar que el tanque de aireación puede mantener niveles aceptables de oxígeno disuelto, lo importante aquí es la depositación de lodos. Pues al ir creciendo la biomasa en el reactor, y como la mezcla no es suficiente, los lodos van aumentando y van obstruyendo el aireador. Debido a ello, el sistema de aireación requiere limpiarse reiteradamente.

Cuando el aireador funciona por encima de los 40Hz, la mezcla en el reactor es más uniforme. El licor mezclado se mantiene en suspensión constantemente y las concentraciones de OD en el TA pueden superar los 7,5mg/l.

Sucedan entonces dos situaciones tomando en cuenta que la concentración de OD en el TA recomendada y requerida se encuentra alrededor de los 2mg/l. La primera refiere al suministro de esos 2mg/l de OD. Que se puede lograr con frecuencias del aireador cerca de los 40Hz. Mientras que la segunda corresponde a evitar que el licor mezclado sedimente.

Como el sistema de lodos activados con aireación extendida se encuentra capacitado para recibir impactos de carga orgánica, requiere de un suministro de OD adecuado. Por tanto, mantener la aireación por encima de los 45Hz permite mantener los niveles de OD apropiados para la depuración de las aguas crudas.

Considerando que los niveles altos de OD fomentan un alto consumo energético. El hecho que se lleve a cabo una mezcla uniforme en el TA, resulta de mayor importancia que mantener una concentración de OD cercana a los 2mg/l. Con las observaciones realizadas durante el arranque y operación de la planta, cuando el aireador funciona a más de 45Hz, el agua residual es tratada adecuadamente. Lo que indica que mantener una concentración de OD cercana a los 5mg/l, o frecuencias cercanas a 40Hz, supone tratamientos apropiados y gastos energéticos moderados.

- b. **Caudal de recirculación:** Para evitar que la tubería de recirculación se obstruya continuamente, el Qr se regulará de acuerdo con la capacidad de la válvula. Por tanto, la recirculación se llevará a cabo a un 50% de capacidad de la válvula. Esto permitirá una recirculación adecuada y evitará una pronta obstrucción de la válvula. Además, no genera movimientos bruscos en el TA.

Durante las pruebas en la planta, se observó como la continuidad en la recirculación de los lodos, somete al panel de control a picos de voltaje que inducen daños en el sistema eléctrico. Como la línea de recirculación permanece encendida, sus componentes eléctricos como el contactor y los fusibles del switch tienden a quemarse fácilmente. Para evitar esto, se puede recircular periódicamente. Con horarios entre 4 y 8h durante cinco días de la semana, la recirculación puede brindar el aporte necesario de masa biológica al reactor.

- c. **Purga de lodos:** con un máximo del 50% y un mínimo del 20% del lodo en el sistema se puede realizar una purga apropiada. En tanto, no se puede exceder $0,5\text{m}^3$ de lodo purgado. Esto implicaría un desecho excesivo de lodo que reduciría la eficiencia del sistema pues disminuye la concentración de SSVLM.

5.6. Elaborar un diagnóstico sobre la eficiencia del tratamiento de aguas y comparar la eficiencia práctica con la teórica

Dadas las observaciones realizadas y los resultados obtenidos, se originó un diagnóstico sobre la operación del sistema, centrado en dos puntos básicos. El primero aborda los factores que afectan directamente la eficiencia del tratamiento de aguas, mientras que el segundo toma los documentos de diseño de la planta, los revisa y genera un análisis para conocer su semejanza con la planta instalada.

5.6.1. Factores que inciden en la eficiencia de la planta

Mediante el control adecuado de los parámetros operacionales de la planta, se puede jugar con la eficiencia de esta. Así como se vio en los resultados anteriores, se pueden conseguir eficiencias de hasta un 82%. Con tal valor, se genera un tratamiento apropiado para el vertido de efluentes que cumplan con el reglamento.

El manual de operación expone que la planta de lodos activados puede alcanzar valores de remoción de carga orgánica de hasta un 90% (basado en un afluente con una DBO de 500mg/l y un efluente con 50mg/l, según Calvo, 2010a). La diferencia entre la eficiencia práctica y la teórica radica en el corto tiempo que lleva la planta funcionando, aunado a las contantes detenciones que sufre la planta debido a las válvulas.

Asimismo, el tratamiento de aguas residuales se ha visto afectado debido a que los componentes eléctricos que posee el panel de control, son susceptibles a las fluctuaciones de la corriente eléctrica. Esto principalmente ha repercutido en el funcionamiento continuo del sistema, puesto que frecuentemente se detiene el proceso para reparar los daños en el panel.

Fundamentalmente, los daños a fusibles y al variador de frecuencia del aireador, han puesto en riesgo la estabilidad de la masa biológica. Esta última ha permanecido sin aireación durante días enteros a lo largo de una semana. Debido a ello, se pierde la agitación y el suministro de oxígeno, lo que modifica la viabilidad de los microorganismos y altera las propiedades de remediación de estos.

Debido a estos problemas de operativos, la planta en su totalidad no llega a un umbral de estabilidad, con el que funcione continuamente y permita alcanzar la eficiencia correcta.

Es imprescindible anotar que del funcionamiento total de la planta, el primordial factor alterante es el panel de control eléctrico. A través de este se manejan todos los dispositivos que posee el sistema, desde las bombas hasta el aireador. Por tanto, cuando el panel no envía señales para que entren a trabajar estos componentes, el tratamiento es afectado negativamente. No se puede recircular lodos hasta el tanque de aireación, el aireador no puede suministrar la agitación ni el oxígeno, así como la purga de lodos no se puede llevar a cabo. Entonces, más allá de los problemas con el recirculado y el afluente, mantener en óptimas condiciones el panel de control, permite que la planta funcione con suma eficiencia.

Y es que los demás parámetros son de un control menos riguroso o de bajo riesgo. Pues el panel eléctrico se ve sometido tanto a picos de voltaje como a ausencia de corriente eléctrica. Entonces, hasta que estas variables no se controlen, el sistema entero va presentar problemas.

Como la planta de tratamiento requiere aireación constante, el panel de control necesita poseer una fuente de energía eléctrica alterna. Que actúe en los casos en que por cualquier motivo, la provisión principal de corriente sea sustituida con el fin de preservar la viabilidad del congregado microbiano, factor sumamente esencial para este tipo de tratamiento de aguas residuales.

5.6.2. Diferencias entre las instalaciones y los documentos de diseño y operación de la planta

Una revisión del Manual de Operación (Calvo 2010) y la Memoria de Cálculo (Calvo, 2010a), resulta en destacadas diferencias existentes entre el diseño planteado y la planta construida.

- a. De los principales aspectos a señalar se encuentra el agua cruda que ingresa a la PTAR. La memoria de cálculo (Calvo, 2010a) apunta que la planta puede recibir aguas residuales con 300mg de sólidos suspendidos totales por litro. No obstante, debido al $Q_{m\acute{a}x}$ de diseño y a las tuberías de instalación, tal concentración de sólidos no puede ingresar a la planta. Como se explicó previamente, esto obstruye la tubería.

De tal manera que para las dimensiones de la planta, se debió especificar que las aguas crudas deben presentar concentraciones de sólidos suspendidos totales por debajo de los 50mg/l. Concentración que no obstruiría la tubería de ingreso.

Se debe recalcar que la planta es para uso académico, y sobre todo, que la planta posee un caudal de diseño muy bajo, que sólo puede presentar bajas concentraciones de todos los parámetros de contaminación.

La instalación del tratamiento primario para la retención de esos sólidos gruesos que trae consigo el agua residual, no prevé que debido al Q_a de diseño, el agua cruda ingresaría a la planta por una pequeña abertura, que recolectaría todo el material presente en el residuo líquido. Esto implica que las rejillas no requieren limpieza diaria. Pues como no ingresan sólidos grandes al sistema, las rejillas no ejercen su función del todo. Por tanto, estas permanecen limpias siempre.



Figura 5.7. Tanque adicional en la planta de lodos activados.

En cuanto a la medición de caudales por volumen, esta refiere al cierre de una válvula que se encuentra después de la caja donde ingresa el agua. Esta caja posee un volumen definido, de manera que se mide el tiempo en que se llena el tanque y se obtiene un caudal (dividiendo el volumen del tanque entre el tiempo que tardó en llenarse).

- c. La planta posee solamente una opción de medición de caudal por volumen, la cual es posible para el Q_a . Sin embargo, sucede que para la medición del Q_a la válvula se ubica poco más de medio metro lejos del tanque donde ingresa el agua cruda. Por tanto, el utilizar esta técnica para medir el caudal afluente, generaría una incertidumbre significativa porque se estaría cronometrando el tiempo que utiliza el agua llenando la tubería posterior. En este caso, medir el Q_a con un recipiente aforado genera un resultado más exacto.

- d. Otro de los puntos de interés encontrado en estos documentos se centra en la purga de lodos. Para ella, se mencionan diferentes criterios a tomar en cuenta para realizarla. Esto genera confusión en el operador de la planta, quien desconoce cuál criterio emplear. Considerando también que estos criterios pueden llegar a contradecirse.

Los criterios que utilizan son los siguientes:

- SSed en TA igual o mayor a 400ml/l.
- Tiempo de retención celular igual a 23 días.
- Realizar la purga con un caudal de 0,22kg SST/ d.

Con tres criterios, se debe decidir cual emplear. Sin embargo, si se usa el primer criterio, puede que se haya superado los 23 días de tiempo de retención celular. Esto, puede generar problemas en los lodos pues pueden perder sus propiedades de depuración y de sedimentabilidad. Mientras que si se utiliza el segundo criterio, es probable que aún no se haya alcanzado la suficiente biomasa en el reactor que supere los 400ml/l de SSed. Considerando también que en la literatura (Metcalf & Eddy, 1996), 30d de retención celular constituye un valor apropiado para la edad de los lodos.

Respecto al tercer criterio, antes de realizar la purga es importante poseer otros datos que fundamenten el hecho que los lodos ya cuenten con una edad suficiente como para ser evacuados del sistema. Puede suceder que la purga sea excesiva y desestabilice la masa microbiana. Por otro lado, el hecho que la purga de lodos muchas veces se realiza de forma intermitente más que continua (Winkler, 1999). Aún así, la tubería no permitiría el desechado de un caudal tan pequeño.

- e. Otro punto de cuidado mostrado en la memoria de cálculo consiste en la disposición del agua tratada. De acuerdo con la memoria, el agua tratada es dirigida de regreso a las lagunas de oxidación del residencial Iztarú. No obstante, el agua depurada es conducida hacia el cauce del Río Toyogres, donde son descargados todos los efluentes de las PTAR en el ITCR.

Vistos los aspectos anteriores sobre las varias diferencias, puede notarse lo imprescindible de estudiar o evaluar las aguas residuales y el sitio donde se instalará el proyecto de tratamiento. Asimismo, el esfuerzo a realizar para controlar las variables de la PTAR, de modo que alcance una depuración eficiente y continua.

5.7 Caracterizar efluente

Para conseguir esta actividad se muestreó el caudal de salida de la planta durante varias semanas. En las muestras recolectadas de forma compuesta, se obtuvieron los siguientes valores.

Tabla 5.5. Valores promedios de las características del agua tratada.

Caudal (l/s)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	SS (mg/l)	SSed (ml/l)	GyA (mg/l)	SAAM (mg/l)	pH	Temperatura (°C)
0,0926	25,26	--	--	--	0,064	--	5-7	20-24

La tabla anterior permite observar las propiedades con las cuales se descarga el agua tratada al cauce natural. De los datos conseguidos, se ve como el efluente cumple con la normativa correspondiente. Mientras que la DBO debe ser menor a 50mg/l, la planta genera efluentes hasta con 25mg/l. Esto aporta un amortiguamiento en caso que el rendimiento de la planta disminuya. Por su parte, las grasas y aceites también se encuentran por debajo de la norma, con 0,064mg/l, cuando la legislación establece un límite de 30mg/l. La temperatura y el pH también se ubican dentro de los límites establecidos.

Los datos ausentes fueron difícilmente obtenidos. Durante el muestreo del efluente para la verificación de estos parámetros, el sistema de tratamiento entró en problemas y el funcionamiento se descontroló. La eficiencia se redujo completamente, y la masa microbiana en el reactor se desestabilizó por completo. Con el fin de explicar los motivos adecuadamente, en el capítulo 6 se abarca el tema.

5.8 Caracterizar desechos, clasificarlos

La determinación de la densidad del lodo resultó en un valor igual a 1,0036g/ml. Dado de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{30,1085g}{30ml} = \frac{1,0036g}{ml} = \frac{1003,6g}{l}$$

Este valor se obtuvo a partir de la masa de 30ml de agua procedente del digestor de lodos. La masa no representa el peso seco de los lodos.

La aplicación del método de Kjeldahl arrojó los siguientes resultados:

Tabla 5.6. Concentración de nitrógeno en los lodos secos, método Kjeldahl.

Muestra	Masa de muestra	Nitrógeno amoniacal	Nitrógeno orgánico
Lodo seco	1,00g	0,14952mg NH ₃ -N/g lodo	0mg N _{org} /g lodo

El nitrógeno orgánico corresponde a la forma ureica del nitrógeno. Esta forma es de difícil asimilación por las plantas. Para poder asimilarlo, se necesita la presencia de la enzima ureasa, que en conjunto con humedad y temperatura puede transformar esa forma en nitrógeno amoniacal.

El nitrógeno en su forma amoniacal es soluble en el agua y puede ser retenido por el suelo. Por ser una forma transitoria, se transforma hacia nitrógeno nítrico. Este último representa la forma de nitrógeno que la planta absorbe en mayor cantidad.

El nitrógeno nítrico es muy soluble en agua y es fácilmente lixiviado bajo el suelo. Durante el tránsito por el suelo, las plantas deben consumirlo para incorporarlo en su metabolismo. Por la premura del proceso, las plantas deben tomarlo rápidamente para no perderlo.

Debido a esto último, es más recomendable que el nitrógeno sea aplicado en su forma orgánica para que durante su transformación hacia nitrógeno nítrico, las raíces de las plantas puedan retenerlo y consumirlo (Mirat Fertilizantes, s.f.).

La cantidad de nitrógeno amoniacal presente en el lodo, produciría muy poco nitrógeno nítrico, que fácilmente puede perderse por el flujo del agua en el suelo.

La determinación de fósforo en los lodos, permitió conocer que la concentración de fósforo en ellos es de 0,0719mg P/g lodo.

Los abonos o fertilizantes comerciales poseen cantidades de nutrientes variadas. Por ejemplo, fertilizantes de nitrato amónico pueden presentar riquezas del nutriente de hasta un 33,5%. Por su parte, los abonos con fósforo como el fosfato monoamónico presentan 61% de P_2O_5 y un 12% de N. Mientras que el fosfato monopotásico, posee una riqueza de 53% de P_2O_5 y 34% de K_2O (Infoagro Systems, S.L., 2011). Estas cantidades son muy superiores al contenido nutritivo del lodo residual generado por la planta. Los porcentajes de nitrógeno y fósforo en el lodo, no alcanzan ni un 1% de la masa del residuo.

Con estos resultados se ve la baja proporción nutritiva de los lodos residuales. Bajas cantidades de nitrógeno amoniacal y fósforo, con ausencia nitrógeno orgánico en ellos. Por tanto, los nutrientes en estos residuos son tan escasos que limita su aprovechamiento en diferentes alternativas.

La presencia de nutrimentos es importante para poder optar por diferentes posibilidades que le otorgan propiedades significativas a estos residuos sólidos. Al poseer tan baja proporción, reduce la gama de alternativas.

Por su parte, la determinación de Coliformes Fecales (CF) dio como resultado 11040 NMP en la muestra de 10ml utilizada. Este valor indica que gran número de microorganismos pueden retenerse en los lodos secos y presentar un riesgo salubre a la hora de manipularlos.

5.9 Búsqueda y aplicación de alternativas de aprovechamiento, uso y disposición

La disposición de este lodo residual presenta una condición importante, puesto que su composición es de aproximadamente sólo un 1% de sólidos y además posee muchos componentes indeseables (Manahan, 2001). No obstante, en Estados Unidos hacia 1993, cerca de 700 millones de galones de lodos fueron producidos por día. De esa cantidad, casi 2,5 millones de toneladas (peso seco) fueron empleados como fertilizante, alrededor de un 40% como material de relleno, y un 20% fue incinerado. Inclusive, en Europa se empleó una cantidad mucho mayor de lodos como fertilizante (Krause, et. al, 2002).

Como abono, el uso de lodos es atractivo debido a su contenido de nitrógeno, fósforo, y azufre. Esto permite que mejore la calidad orgánica de los suelos, una ayuda muy importante para los ecosistemas que se desenvuelven ahí así como para los usos que se deseen dar a ese suelo (Krause, et. al, 2002).

Entre otros usos también se destaca el uso en granjas, en restauración forestal y en el rejuvenecimiento de áreas mineras. Asimismo puede utilizarse para evitar la escorrentía en exceso (Krause, et. al, 2002). Si el lodo es digerido de forma anaeróbica, a través de mecanismos metanogénicos se produce dióxido de carbono y gas metano. Este procedimiento reduce en un 60% el volumen y su contenido de materia volátil. Muy bien diseñada, una planta puede generar un importante aporte energético a través del metano producido (Manahan, 2001).

A pesar de sus propiedades como fertilizante y mejorador de suelos, es necesario recalcar la importancia de pretratar los lodos antes de reutilizarlos. Esto responde a que usualmente ellos poseen un contenido alto de metales pesados, los cuales deben ser removidos para cualquier uso en industria alimentaria (agrícola o afines). Sin embargo, a pesar de esto puede emplearse para fertilizar campos de golf o similares (Swaddle, 1997).

Aparte de los metales pesados y otras sustancias tóxicas, estos lodos pueden presentar ciertos microorganismos patógenos. Es necesario eliminarlos antes de reutilizarlos para

diferentes actividades. Un análisis de la composición microbiológica de los lodos ha entregado resultados que muestran la presencia de bacterias del género *Spirillum*, *Vitreoscilla*, *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Zoogloea*, además de spirobacterias, gram negativas y otros tipos. Asimismo se han encontrado ciertos protozoarios como flagelados, ciliados y amebas. Ente ellos: *Paramecium*. Además estos análisis también han demostrado la presencia de nemátodos o rotíferos, por ejemplo *Rotifer* (Degremont, 1991²).

Considerando lo anotado previamente, puede verse como los lodos residuales son empleados con mayor frecuencia como mejoradores de suelo o abonos. Siendo esta, la opción más barata de disposición o aprovechamiento.

No obstante, conociendo la cantidad de Coliformes Fecales (CF) presentes en la masa del lodo seco en el lecho, cabe destacar el riesgo microbiológico presente en el empleo de este residuo como abono. Al utilizar el lodo como mejorador de suelo, debe prestarse especial cuidado de los lugares y las especies vegetales a las cuales es aplicado el residuo. Debe alertarse que la aplicación debe realizarse con normas de seguridad que eliminen el riesgo.

La presencia de CF en el residuo seco indica la probabilidad de existencia de otros microorganismos patógenos. Esto limita las posibilidades de uso del lodo, pues pueden generar problemas en la salud.

Por otro lado, debido a la cantidad de lodo producido por la planta el aprovechamiento de este se ve limitado. Es difícil trabajar con cantidades de 200g de residuo, pues no lograría alcanzar los beneficios nutricionales implícitos en el lodo. Se necesitarían cantidades mayores del residuo para generar un beneficio significativo.

La presencia de tal cantidad de lodo en el lecho no origina problemas de obstrucción o disminución de la eficiencia en el secado. Por ello, el residuo no origina problemática de disposición. Puesto que con purgas mensuales de lodos, al año se obtendrían cerca de 2,4kg de lodo, lo que significaría alrededor de 1cm de capa de lodo en el lecho.

² Citado por Lenntech Water Treatment Solutions, 2009.

Por tanto, la disposición de este desecho cobraría relevancia hacia después de 3 años de funcionamiento continuo de la planta. Situación que está gobernada por muchas variables de la PTAR, las cuales son de control constante.

CAPÍTULO 6

LA REALIDAD DE LA PLANTA CONSTRUIDA

6.1 Repercusiones en la ejecución del proyecto de graduación

A nivel nacional se ha visto como día a día aumenta la cantidad de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estas pueden conseguirse prefabricadas o pueden ser diseñadas y luego construidas. En todo el territorio costarricense abundan las plantas depuradoras de agua residual; no obstante, sus condiciones de operación no siempre son las mejores.

La realidad en cuanto a esto refiere a errores efectuados desde el diseño de los sistemas de tratamiento, hasta la construcción de las plantas. Para la confección de estas unidades depuradoras, se requiere conocer las características de las aguas residuales que alimentarían la planta. Asimismo se deben seguir modelos que permitan construir instalaciones que funcionen con una eficiencia significativa y cumpla además con la normativa nacional.

Se encuentran entonces PTAR en todo el país que incumplen con los parámetros de carácter obligatorio en el efluente. Plantas depuradoras que solamente funcionan como un canal más por el cual transcurre el agua residual hacia un cuerpo de agua o un alcantarillado. Tanques de agua sucia que aparte de contaminar el ambiente, ponen en riesgo la salud de la población.

Y es que, resulta imprescindible un papel fiscalizador de los ministerios correspondientes, pues ante un inminente detrimento del medio, la búsqueda constante por anomalías debe ser rigurosa.

Se observan así instalaciones abandonadas, que ante tantas faltas en el diseño, se traducen hacia la construcción y por ende generan sus respectivas consecuencias sobre la operación. Por tanto, obligan a los operadores y administradores a sucumbir a la constante problemática. Por ello, se abandonan los proyectos como la única acción frente a la limitación de soluciones.

Casos como los de las PTAR localizadas en los cantones de Santa Ana y Moravia, en San José. Donde en la primera la eficiencia del sistema no permite un tratamiento adecuado, y en la cual un nivel freático muy alto promueve la dispersión del efluente en el agua subterránea. Mientras que en la segunda, la estructura se encuentra sobredimensionada y los costos de electricidad se van para arriba. Por lo que para disminuir gastos, muchas veces el agua continúa directo al cauce natural donde descarga el efluente. Situaciones similares se presentan en la planta de San Pedro de Heredia, y en la PTAR de Guachipelin en San José.

Con estos sucesos, la nueva planta de tratamiento de aguas residuales tipo lodos activados del ITCR no fue la excepción. Las aguas que recibiría según su diseño, no permiten su adecuado funcionamiento pues obstruyen su válvula de ingreso. Tuberías sobredimensionadas, y un tratamiento primario -rejillas- sin funcionalidad.

Por otro lado, un panel de control cuyos componentes no pueden suministrar un fluido eléctrico continuo pues por su calidad, no resisten fluctuaciones normales en la corriente eléctrica. Situaciones que no permitieron se diera una estabilización correcta en la flora microbiana. Por ello, constantemente se detenía el proceso depurativo y el efluente no cumplía con la legislación.

Ante esto, se debió omitir actividades del presente proyecto de graduación, puesto que la discontinuidad en la operación atrasaba los muestreos. Los frecuentes daños en el panel de control paralizaban el funcionamiento, desactivaba la aireación, y ponía en riesgo la viabilidad de la masa biológica. Debido a esto, la caracterización del efluente resultó incompleta, puesto que cuando el sistema se encontraba rumbo a una estabilización apropiada, comenzaron los problemas con la planta. Esto, posterior a dos meses después del arranque.

La planta fue diseñada por ingenieros de Durman Esquivel S.A. Cuando el panel se dañó por primera vez, hacia inicios de octubre del 2010, se contactó inmediatamente a los respectivos encargados en Durman Esquivel S.A. No obstante, no fue hasta en la segunda semana de diciembre del mismo año que llegaron a corregir los problemas. La lograron poner a funcionar, aunque el técnico enviado no traía consigo los repuestos correspondientes.

Cuanto más daños percibía la planta, mucho más tiempo se tomaban los personeros de la empresa en repararlos. Esto, hasta que se perdió la garantía respectiva, en febrero del 2011.

De los principales problemas, el trabajo forzado de la bomba de recirculación ante la obstrucción de la tubería correspondiente y como fundamental, la constante quema de los contactores en el panel eléctrico. Esto último repercute sobre todo el sistema. Y es que este tipo de componentes deben estar constituidos por elementos resistentes pues es una parte del sistema de tratamiento que permanece funcionando siempre. Por tanto, debe resistir choques, impactos eléctricos, o por lo menos, presentar una vida útil muy larga, que no altere la operación normal.

Es incómodo trabajar en un sistema que frecuentemente se venga abajo, más cuando se ha puesto mucho recurso capital y humano en él. Por otra parte, un sistema que remedie aguas residuales y que las vierta tratadas a un cuerpo receptor natural, debe garantizar en todo momento que las cargas contaminantes están siendo reducidas eficientemente. No es posible estar recibiendo aguas residuales y estar vertiéndolas con las mismas características, que inclusive pueden llevar una carga mayor ante el arrastre de los lodos en el reactor.

Quienes diseñen y construyan estas PTAR, deben ser responsables por sus diseños y construcción. Además, deben velar, en un tiempo determinado, por el arranque y la operación. Es una responsabilidad de primera mano al desarrollo sostenible y en segunda, al cliente, de quienes obtienen los recursos.

El papel de Ingeniero Ambiental, es menester para propiciar las soluciones y corregir estos escenarios. No obstante, cuando las unidades son disfuncionales desde su origen, es muy difícil la corrección posterior a su entrada en operación. Se debe insistir en una evaluación preliminar de las propiedades y condiciones de los residuos líquidos, para definir así un diseño apropiado y exclusivo para su descontaminación. Muchas veces la generalización en el diseño sirve para ahorrar costos y tiempo, pero los resultados de la eficiencia de estos proyectos han demostrado que no se ajustan a la normativa vigente, sin embargo, no todos los contextos se prestan para tal enfoque.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIÓN

7.1 Conclusiones

- a. La planta de lodos activados del ITCR puede funcionar con valores de eficiencia alrededor del 82% bajo un funcionamiento constante. Esta eficiencia puede aumentarse a valores superiores al 90% cuando los parámetros que merman la continuidad del proceso se controlan adecuadamente. Tal eficiencia se basa en la remoción de DBO del agua cruda que ingresa a la planta.
- b. Dada la discontinuidad en el funcionamiento de la planta, se dificultó el alcance de valores de eficiencia superiores. Constantemente el sistema sufría altercados y la flora microbiana se desestabilizaba. Debido a ello, la planta no ha experimentado su pico de eficiencia, ni un funcionamiento continuo estable.
- c. Para que el sistema alcance una estabilidad acorde con su capacidad, es preciso seguir las siguientes acciones. Ellas representan las condiciones de funcionamiento óptimo de la planta:
 - a) Regulación diaria de caudal afluente.
 - b) Regulación diaria de caudal de recirculación.
 - c) Frecuencia del variador de aireación igual a 45Hz.
 - d) Purga de lodos mensual.

- d. El panel de control constituye el principal factor alterante del sistema puesto que representa el suministro eléctrico. Cuando este falla, la planta no puede operar y el tratamiento se detiene. Sus componentes son susceptibles a variaciones de voltaje, sufriendo daños constantemente, de manera que un proceso continuo es difícil de llevar a cabo.
- e. La válvula de entrada y las tuberías del sistema se encuentran sobredimensionadas, por lo que se deben regular caudales para la circulación de residuos líquidos en toda la planta. El agua cruda incorpora gran cantidad de sólidos que obstruyen la válvula de ingreso, mientras que la recirculación diaria de lodos atasca la tubería. Esto último impone un esfuerzo adicional al trabajo de la bomba, lo que socava su vida útil. Ante esto, las tuberías deben ser limpiadas diariamente para permitir un proceso continuo de la planta. Para lograr esto, se abren completamente las válvulas y se permite el flujo de lodos o agua residual.
- f. El lodo residual presenta 0,14952mg $\text{NH}_3\text{-N/g}$ lodo, 0,0719mg P/g lodo y 11040NMP de CF. Por purga, al lecho de secado llegan aproximadamente 200g de lodo proveniente del digestor.
- g. Por sus bajas propiedades nutritivas, el lodo aportaría cantidades despreciables de nutrimentos, ya sea como mejorador de suelo o fertilizante. Cantidades bajas de nitrógeno y fósforo no permitirían el mejoramiento de un suelo pobre en nutrientes, ni significarían aportes importantes para una planta.
- h. El lodo que alcanza el lecho no constituye una cantidad significativa para poder aprovecharse. Esta cantidad es difícil de recoger del lecho, pues se pega a la superficie y no se origina una capa gruesa que permita su remoción.

-
- i. Debido a la presencia de CF, el lodo residual generado por la planta no puede ser aprovechado como fertilizante de cualquier especie vegetal ni como mejorador de todos los suelos. Debería ser empleado en plantas que no constituyan especies de consumo, debido al contenido de estos organismos patógenos. El riesgo disminuye según el tipo de suelo, aún así debe mantenerse precaución.

7.2 Recomendaciones

- a. Asignación de un operador, responsable por el funcionamiento diario de la planta. Encargado de los ajustes diarios que merece la planta y de reportar daños en el funcionamiento del sistema. El encargado aseguraría el trabajo continuo del sistema, limpiando las tuberías y variando los caudales de recirculación.
- b. Instalación de tuberías y válvulas acordes con el diseño de la planta. Las conexiones actuales de la planta se están subutilizando, al estar trabajando a un 8% - aproximadamente- de su capacidad total.
- c. Pretratar el afluente para remover sólidos gruesos y suspendidos, de manera tal que se evite que la tubería y válvula de alimentación de la planta se atasquen frecuentemente debido a la composición física del agua cruda. Esto contribuiría principalmente a la continuidad del proceso, y evitaría impactos de carga orgánica y volumétrica al sistema.
- d. Instalar dispositivo generador de corriente eléctrica para permitir una continuidad en el trabajo de la planta. Actualmente no existe dispositivo que brinde energía eléctrica en caso que esta se ausente. Por tanto, cuando se ausenta el fluido eléctrico, toda la planta permanece sin funcionamiento, poniendo en riesgo la flora microbiana del sistema. El dispositivo mantendría en funcionamiento la aireación y la recirculación, parámetros indispensables del proceso depurativo.
- e. Este dispositivo alternativo de corriente puede programarse para suministrar solamente, la energía eléctrica necesaria para mantener viable la masa biológica. En caso que la corriente permanezca ausente mucho tiempo, la regulación del suministro permite generar ahorros de energía y por tanto reducción de costos.

-
- f. Dada la sensibilidad de los componentes del panel de control, instalar un regulador de voltaje para evitar picos de este, aumentaría significativamente la vida útil de esos elementos eléctricos. Con este, el panel de control se vería sometido a menos daños y la planta permanecería en funcionamiento continuamente.

 - g. Fiscalizar el trabajo de los profesionales que diseñan y construyen sistemas de tratamiento de aguas residuales. Tomar acciones para que se responsabilicen a la hora de instalar PTAR y disminuir así los proyectos abandonados por ineficientes.

7.3 Bibliografía

Calvo, R. (2010) “Manual de operación y mantenimiento: Planta de tratamiento de aguas residuales”. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, Cartago. Febrero. 44p.

Calvo, R. (2010a) “Memoria de Cálculo: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Modelo 5m³”. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, Cartago. 19p.

Eckenfelder, W. (1998) “Activated Sludge Process Design and Control: Theory and Practice.” United States of America: Water Quality Management Library. Second Edition. Vol. 1. 334p.

Horan, N. (1990) “Biological wastewater treatment systems: theory and operation”. Inglaterra: Jonh Wiley & Sons Ltd. 310p.

Infoagro Systems, S.L. (2011) “Los abonos y fertilizantes”. En: http://www.infoagro.com/abonos/abonos_y_fertilizantes.htm. Revisado Marzo 2011.

Krause, S. Clark, H. Ferris, J. Strong, R. (2002) “Chemistry of the Environment”. USA, New York: Elsevier Science & Technology Books. pp: 434-438.

Lenntech Water Treatment Solutions. (2009) “Tratamiento de lodos: componentes de los lodos”. En: <http://www.lenntech.es/lodos-componentes.htm>. Revisado Febrero 2010.

Manahan, S. (2001) “Fundamentals of Environmental Chemistry”. Boca Raton: CRC Press LLC. Second Edition. pp. 419-425.

Metcalf & Eddy, Inc. (1996) “Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización”. México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. Vol. 1. 1459p.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003) “Wastewater Engineering: Tratamiento y reuso”. McGraw-Hill. Cuarta Edición. Vol. 2. pp: 740-750.

Mirat Fertilizantes. (s.f.) “Fertilizantes: Nutrición Vegetal”. En: <http://www.mirat.net/fertilizantes/nutricion/macronutrientes/nitrogeno.htm>. Revisado Marzo 2011.

Poder Ejecutivo. (2007) “Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales”.
DECRETO N° 33601-MINAE-S, La Gaceta 55, Alcance 8, lunes 19 de marzo de 2007.

Swaddle, T. (1997) “Inorganic Chemistry: An Industrial and Environmental Perspective”.
USA, San Diego, California: Elsevier Science & Technology Books. pp: 263-279.

Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y el Tratamiento de Aguas Residuales (Red
ALFA TECSPAR). (2009) “Manual de Tecnologías Sostenibles en Tratamiento de
Aguas”. En:

<http://www.tecspar.org/Documentos/Manual%20de%20Tecnologias%20Sostenibles%20en%20Tratamiento%20de%20Aguas.pdf>. Revisado Marzo 2010.

Winkler, M. (1999) “Tratamiento biológico de aguas de desecho”. México: Editorial
Limusa. pp: 87-126.