

# TRABAJO DE ESPECIAL DE GRADO

## DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR HÍBRIDO DE BIOPELÍCULA SUMERGIDA (BIO-NET) Y COMPARACION CON UN SISTEMA CONVENCIONAL DE LODOS ACTIVADOS, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.

**Tutores:**

**Académico:** Ing. María Rincones

**Industrial:** Ing. Joaquín Henríquez

Presentado a la ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Para optar al título de

**Ingeniero Químico** por:

Br. María del Pilar Mesa Losada

Br. Luis Alberto Ponce Martínez

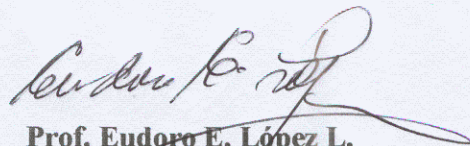
Ciudad Universitaria, junio de 2004

Caracas, 10 de Junio de 2004

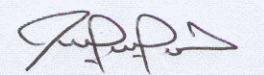
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres María del Pilar Mesa Losada y Luis Alberto Ponce Martínez, titulado

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR HÍBRIDO DE BIOPELÍCULA SUMERGIDA (BIO-NET) Y SU COMPARACIÓN CON UN SISTEMA CONVENCIONAL DE LODOS ACTIVADOS, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES**

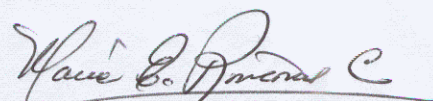
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico y sin que ello signifique que se hacen solidarios con la ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



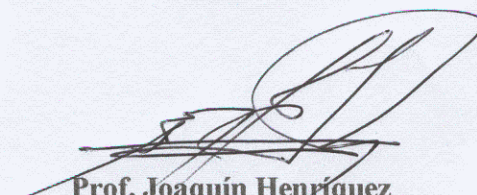
Prof. Eudoro E. López L.  
Jurado



Prof. José F. Fernández  
Jurado



Prof. María E. Rincones C.  
Tutor Académico



Prof. Joaquín Henríquez  
Tutor Industrial



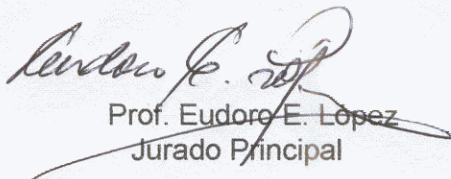
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

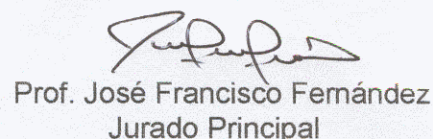


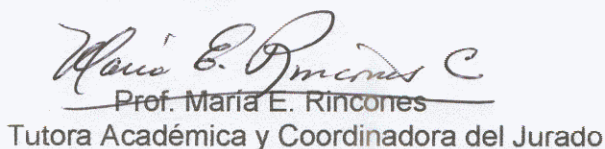
## ACTA MENCIÓN HONORÍFICA

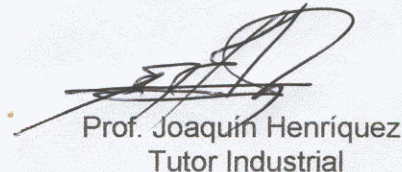
Los abajo firmantes, miembros del Jurado Examinador del Trabajo Especial de Grado “Diseño y Evaluación de un Reactor Híbrido de Biopelícula Sumergida (Bio-Net) y su Comparación con un Sistema Convencional de Lodos Activados para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales” presentado por los Bachilleres **María del Pilar Mesa Losada y Luis Alberto Ponce Martínez**, queremos dejar constancia del nivel del trabajo realizado, ya que el mismo en cuanto a su ejecución, presentación y utilidad de los resultados ameritó que se le asignara la nota máxima de **Veinte puntos (20)**. Así mismo, hemos decidido, por unanimidad, concederle **MENCIÓN HONORÍFICA** como reconocimiento a la excelencia del trabajo realizado, por la aplicación del Método Ingenieril en la solución del problema planteado, así como por el aporte en la generación de parámetros de diseño y su aplicación a la tecnología de sistemas híbridos en el tratamiento de aguas residuales municipales en zonas tropicales.

En Caracas, a los diez días del mes de Junio del año dos mil cuatro

  
Prof. Eudoro E. López  
Jurado Principal

  
Prof. José Francisco Fernández  
Jurado Principal

  
Prof. María E. Rincones  
Tutora Académica y Coordinadora del Jurado

  
Prof. Joaquín Henríquez  
Tutor Industrial



## DEDICATORIA

En primer lugar a Dios, por permitirme terminar exitosamente este  
trabajo

A mis padres, Faustino y Nena por su apoyo y comprensión durante  
este largo camino.

A mi novio, Dany, por acompañarme y darme su amor y apoyo durante  
todos los momentos difíciles que viví durante este proyecto.

María del Pilar Mesa

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme vivir, a mis padres por darme la vida, a mis hermanos por apoyarme en todo situación y a mis amigos y profesores por apoyarme cuando lo necesite.

LUIS PONCE

A Dios por enseñarme tantas cosas entre ellas a intentar hace siempre bien las cosas, así sea en las peores condiciones.

Al Profesor Alfredo Jácome, profesor da Universidade da Coruña, Galicia, España, por todo su apoyo, ayuda, enseñanzas, por las frecuentes revisiones a las múltiples versiones; por facilitarme sus publicaciones, en fin por ser el co-autor de esta tesis.

A mi padre, por estar conmigo operando los sistemas todos y cada uno de los fines de semana que abarcan este proyecto.

A Dany, mi novio, el amor de mi vida, por estar junto a mi con sus consejos, apoyo y opiniones certeras respecto a todo lo relacionado con esta evaluación. Por enseñarme a manejar los programas que no conocía y perfeccionar los conocimientos previos.

A mi mamá por su cariño, apoyo y por cuidar de mi salud a lo largo de este largo camino.

A Vidal Barrera por ser el fotógrafo estrella de este trabajo y al cual se le deben las fotografías que pueden observar en este trabajo.

A Christiam Rojas, por ser el mejor compañero de trabajo que pude tener.

Al profesor Sergio Rodríguez por enseñarme el mantenimiento de los compresores, así como sus consejos certeros en los momentos más necesarios.

A los profesores de la escuela de eléctrica Rafael Rivero, Carolina Regoli y María Eugenia Álvarez por el consejo más certero en el momento más oportuno.

A la profesora Vanessa Miguel, por sus buenos consejos que me enseñaron a tomar sabias decisiones.

Al Ingeniero Joaquín Henríquez por donar el medio para esta investigación, así como resolver siempre las dudas que se presentaron a lo largo de la evaluación.

Al Profesor Henry Blanco por sus consejos gracias a los cuales se lograron algunos de los aportes de esta investigación.

A la profesora María Virginia Najul, pues gracias a sus enseñanzas se realiza de manera certera la evaluación hidráulica de este trabajo.

A Julián Guerra, por la cantidad de veces que siguiendo de manera apropiada mis instrucciones operó de manera correcta los sistemas en sus múltiples madrugadas en la planta.

A todos Uds. con mucho cariño, gracias

*MARIA DEL PILAR MESA*

**Mesa L., María del Pilar; Ponce M, Luis A.**

**DISEÑO Y EVALUACION DE UN REACTOR HIBRIDO DE BIOPELÍCULA SUMERGIDA (BIONET) Y COMPARACIÓN CON UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES**

**Tutor Académico: Ing. María Rincones. Tutor Industrial: Ing. Joaquín Henríquez: Tesis de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2004, 160 pp.**

**Palabras claves:** biopelícula aerobia, lecho fijo sumergido, remoción de materia carbonácea, sistemas híbridos.

**RESUMEN**

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño, construcción y evaluación de un reactor híbrido de lecho fijo, aireado, sumergido y su comparación con un sistema de lodos activados, para la remoción de materia orgánica, expresada en términos de DBO y DQO. La metodología incluye una primera parte que implica la revisión bibliográfica que permite establecer los parámetros de diseño apropiados para lograr una construcción de los dos sistemas a evaluar lo más similar posible y que sólo se diferencien en la presencia del medio, el cual está conformado por cilindros huecos de polietileno. El diseño incluye dos tanques de aireación, dos sedimentadores, un sistema de reciclo para cada uno, así como el sistema de alimentación de ambos. Adicionalmente se seleccionan los materiales apropiados para la construcción, así como las tres etapas a evaluar: aireación extendida, convencional y alta rata, con tiempos de retención hidráulico de 15, 10 y 5 h, respectivamente. La segunda fase incluye la evaluación preliminar de las unidades, pues a la escala utilizada no se conocen valores normalizados para los diferentes dispositivos. Dicha evaluación incluye una prueba de trazadores, que permite establecer las características hidráulicas y además la evaluación del sistema de aireación. La tercera fase incluye la evaluación de cada etapa y por último, la comparación general de las mismas.

Los parámetros de diseño y la construcción de los sistemas permiten cumplir con los objetivos trazados. La evaluación tiene como finalidad verificar la capacidad

de respuesta de estos sistemas para manejar aumentos progresivos en la carga orgánica aplicada. Las relaciones que se establecen entre la carga orgánica, la carga volumétrica y la eficiencia de los sistemas; permiten establecer la elevada capacidad de respuesta del sistema híbrido a aumentos progresivos en las cargas aplicadas, al contrario del sistema de lodos activados que tiende a perder eficiencia. El sistema híbrido permite lograr eficiencias de remoción en función de la  $DBO_{5,20}$  en un rango alrededor de 80 %; por el contrario, el sistema de lodos activados, disminuye su eficiencia un promedio de 15 %, en función de  $DBO_{5,20}$ , al compararlo con la modalidad convencional (10 h), cuando opera con un tiempo de retención de 5 h. Adicionalmente el sistema híbrido permite obtener un efluente altamente estabilizado ( $DBO_{5,20} \approx 25$  mg/l), mientras que el sistema de lodos activados presenta un efluente con una concentración alrededor de 60 mg/l. Esto implica que el sistema híbrido permite obtener un efluente que cumple tanto con el Decreto 883 Gaceta Oficial N° 5021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1995 ( $DBO_{5,20} \approx 60$  mg/l) nivel nacional, como con la Normativa de la Unión Europea vigente, Decreto 91/271, ( $DBO_{5,20} \approx 25$  mg/l) operando en igualdad de condiciones que un sistema de lodos activados, con la mitad del volumen. Otro resultado importante es que el período de arranque para el sistema híbrido es la mitad del tiempo que requiere un sistema de lodos activados tradicional. (tres semanas el sistema híbrido y casi 50 días el sistema de lodos activados). Por último se debe destacar que el parámetro de control más importante para el sistema híbrido es el oxígeno disuelto (OD), (para oxígeno residual entre 2 y 4 mg/l) el cual debe ser considerado con especial cuidado, para lograr resultados satisfactorios. Todo lo antes señalado permite concluir que el sistema híbrido constituye una alternativa viable para solucionar problemas de sobrecarga en sistemas de lodos activados y además es apropiado cuando se requiere elevada eficiencia y unidades compactas.

## INDICE

<u>TEMA</u>	Pag.
<b><u>CAPITULO 1</u></b>	
1.-INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- OBJETIVOS GENERALES.....	4
1.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
<b><u>CAPÍTULO 2</u></b>	
2.- ANTECEDENTES .....	5
<b><u>CAPÍTULO 3</u></b>	
3.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	14
3.1.- PROCESOS DE LODOS ACTIVADOS.....	18
3.1.1- PARAMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN EN LODOS ACTIVADOS.....	19
• Tiempo hidráulico.....	19
• Relación sustrato-microorganismo.....	20
• Tiempo de residencia celular.....	21
• Recirculación de lodo.....	21
• Purga del lodo.....	22
3.1.2.- PROBLEMAS EN LA OPERCIÓN DE UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS.....	22
3.2.- SISTEMAS COMBINADOS.....	24
3.3.- SISTEMAS HÍBRIDOS.....	25
3.3.1.- PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO	26
• Dimensionamiento.....	26
• Propiedades del medio soporte.....	27
• Cociente del volumen del reactor.....	28
• Carga orgánica.....	28
• Producción de lodo.....	22
• Eficiencia del sistema híbrido.....	29
3.3.2.- MEDIOS DE SOPORTE PARA SISTEMAS HÍBRIDOS...	31
• Características generales de un medio de soporte.....	31
• BIONET.....	32
• Ventajas del BIONET como medio de soporte en sistemas híbridos.....	32



• Criterios de configuración a considerar cuando se utiliza BIONET en un sistema de lechos fijos.....	33
3.3.3.- MEJORAS DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CON BIOMASA ADHERIDA FIJA SUMERGIDA.....	36
3.4.- COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA HÍBRIDO Y EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.....	38
<b>CAPÍTULO 4.-</b>	
4.- FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	41
4.1.- Primera Fase: Desarrollo Conceptual e Ingeniería Constructiva.....	42
4.1.1.- Revisión bibliográfica.....	42
4.1.2 - Definición de los parámetros de diseño de los sistemas.....	42
4.1.3.- Selección de las etapas a evaluar.....	43
4.1.4.- Selección de los materiales y construcción de los equipos.....	44
4.2.- Segunda Fase: Evaluación preliminar.....	44
4.2.1.- Evaluación hidráulica: Prueba de trazadores.....	44
4.2.2.- Evaluación del sistema de aireación.....	45
4.3.- Evaluación comparativa por etapa de los sistemas.....	45
4.3.1.- Arranque: formación de la biomasa.....	45
4.3.2.- Inicio de la operación continua.....	47
4.3.3.- Evaluación de los sistemas (lodos activados y sistema híbrido).....	49
4.3.4.- Metodología para el control de operación y mantenimiento de los sistemas.....	50
4.3.4.1.- Fijación, mantenimiento de caudal constante y medición del mismo.....	50
4.3.4.2.- Metodología para captar muestras instantáneas y compuestas.....	50
4.3.4.3.- Control del sistema de aireación.....	51
4.3.4.4.- Operación y mantenimiento de los sedimentadores...	51
4.3.4.5.- Control del tiempo de retención celular.....	51
4.4.- Cuarta Etapa: Evaluación y comparación general de los resultados...	52

## **CAPÍTULO 5.-**

5.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	54
5.1.- DESARROLLO CONCEPTUAL E INGENIERÍA CONSTRUCTIVA DE LOS SISTEMAS.....	56
5.1.1.- Parámetros de diseño.....	56
5.1.2.- Descripción general de los equipos.....	60
• Sistema híbrido.....	60
• Sistema de lodos activados.....	62
• Características comunes en ambos sistemas.....	63
5.1.3.- Construcción de los sistemas.....	66
5.2.- EVALUACIÓN PRELIMINAR.....	69
5.2.1.- Evaluación hidráulica: Prueba de trazadores.....	69
• Sistema híbrido.....	70
• Sistema de lodos activados.....	73
5.2.2.- Evaluación del sistema de aireación.....	76
5.3.- Evaluación comparativa por etapas de los sistemas.....	78
5.3.1.- Arranque: Formación de la biomasa.....	79
5.3.1.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	79
5.3.1.2.- Variación de los SSVLM Y Sólidos Sedimentables en ambos sistemas.....	83
• Sistema híbrido.....	83
• Sistema de lodos activados.....	84
5.3.1.3.- Comparación visual de la biomasa presente en ambos sistemas.....	87
• Sistema híbrido.....	87
• Sistema de lodos activado.....	88
5.3.1.4.- Comparación de la eficiencias de remoción durante el arranque ( sistemas operados por cargas).....	90
5.3.1.5.- Puesta a punto de los sistemas.....	92
5.3.1.5.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	93
5.3.1.5.2.- Parámetros de operación.....	94
5.3.1.5.3.- Comparación de los sólidos en los sistemas....	96

• Sistema híbrido.....	96
• Sistema de lodos activado.....	98
5.3.1.5.4.- Comparación de la biomasa en los sistemas...	99
5.3.1.5.5.- Comparación de las eficiencias de remoción...	101
5.3.2.- Primera Etapa: Aireación Extendida.....	102
5.3.2.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	103
5.3.2.2.- Parámetros de operación. ....	104
5.3.2.3.- Comparación de los sólidos en los sistemas.....	105
• Sistema híbrido.....	105
• Sistema de lodos activado.....	106
5.3.2.4.- Comparación de la biomasa en los sistemas.....	107
5.3.2.5.- Comparación de las eficiencias de remoción .....	108
5.3.2.6.- Comparación de los sistemas en estado estacionario durante la primera etapa.....	110
5.3.2.6.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	110
5.3.2.6.2.- Comparación de la calidad del efluente obtenido.....	111
5.3.2.6.3.- Resultados obtenidos respecto a la conversión de nitrógeno .....	113
5.3.3.- Segunda Etapa: Convencional .....	114
5.3.3.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	114
5.3.3.2.- Parámetros de operación.....	116
5.3.3.3.- Comparación de los sólidos en los sistemas.....	117
• Sistema híbrido.....	117
• Sistema de lodos activado.....	118

5.3.3.4.- Comparación de la biomasa en los sistemas.....	119
5.3.3.5.- Comparación de las eficiencias de remoción.....	120
5.3.2.6.- Comparación de los sistemas en estado estacionario durante la segunda etapa.....	122
5.3.3.6.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	122
5.3.3.6.2.- Comparación de la calidad del efluente obtenido.....	123
5.3.3.6.3.- Resultados obtenidos respecto a la conversión de nitrógeno .....	126
5.3.4.- Tercera Etapa: Alta Rata.....	127
5.3.4.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	127
5.3.4.2.- Parámetros de operación.....	130
5.3.4.3.- Comparación de los sólidos en los sistemas.....	130
• Sistema híbrido.....	130
• Sistema de lodos activado.....	131
5.3.4.4.- Comparación de la biomasa en los sistemas.....	133
5.3.4.5.- Comparación de las eficiencias de remoción .....	135
5.3.4.6.- Comparación de los sistemas en estado estacionario durante la segunda etapa.....	137
5.3.4.6.1.- Parámetros fisicoquímicos.....	137
5.3.4.6.2.- Comparación de la calidad del efluente obtenido.....	139
5.3.4.6.3.- Resultados obtenidos respecto a la conversión de nitrógeno .....	141
5.3.5.- Relación de cargas aplicadas en función de las eficiencias de remoción para ambos sistemas.....	142
• Sistema híbrido.....	142
• Sistema de lodos activados.....	144

5.3.6.- Evaluación comparativa de los sistemas.....	147
5.3.6.1.- Comparación por etapas.....	147
• Arranque.....	148
• Aireación Extendida.....	148
• Convencional.....	149
• Alta Rata.....	150
5.3.6.2.- Comparación del desempeño entre ambos sistemas en función de la carga volumétrica aplicada.....	151
5.3.6.3.- Influencia del Tiempo de Retención Hidráulica.....	153
5.3.6.4.- Funcionamiento de los sedimentadores.....	155
5.3.6.5.- Diferencia en la aplicación de los parámetros de control.....	156
<b><u>CAPITULO 6.-</u></b>	
6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	157
<b><u>CAPITULO 7.-</u></b>	
7.- BIBLIOGRAFÍA.....	163
<b><u>CAPITULO 8.-</u></b>	
8.- ANEXOS.....	172

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Características Fisicoquímicas de la Planta de Guaparo.....	2
Tabla 2.- Tipos principales de procesos aerobios.....	17
Tabla 3.- Cargas orgánicas típicas para medios de soporte sumergidos.....	29
Tabla 4.- Eficiencia esperada en los sistemas de lechos sumergidos aireados ...	30
Tabla 5.- Características de empaque tipo BIONET para remoción de DBO.....	32
Tabla 6.- Carga aplicada por unidad de superficie para las diferentes aplicaciones de empaque de lecho fijo BIONET.....	34
Tabla 7.- Recomendaciones para el área superficial específica instalada cuando se utiliza el BIONET.....	34
Tabla 8.- Cuadro comparativo entre los dos tipos de sistemas.....	40
Tabla 9.- Características de las modalidades del lodo activado consideradas....	43
Tabla 10.- Frecuencia de determinación de variables fisicoquímicas.....	47
Tabla 11.- Frecuencia de determinación de los análisis de control.....	47
Tabla 12.- Frecuencia para evaluar los parámetros en los sistemas a evaluar....	48
Tabla 13.- Metodología analítica empleada para determinar los parámetros involucrados en los sistemas a evaluar.....	49
Tabla 14.- Fundamentos empleados en el diseño de los equipos para el sistema híbrido.....	59
Tabla 15.- Fundamentos empleados en el diseño de los equipos para el sistema de lodos activados.....	59
Tabla 16.- Dimensiones del tanque de aireación y del sedimentador en los dos sistemas a evaluar en le presente trabajo.....	60
Tabla 17.- Resultados de la recuperación de los trazadores en los sistemas.....	70
Tabla 18.- Resultados de los tiempos de retención para el sistema híbrido.....	71
Tabla 19- Evaluación de los parámetros estadísticos para el sistema híbrido.....	71
Tabla 20 Valores obtenidos según el método de Wolf Resnisk simplificado, para el sistema híbrido.....	72
Tabla 21- Valores obtenidos según el modelo de dispersión y del índice de	72



variación de Levenspiel para el sistema híbrido.....	
Tabla 22- Evaluación de los parámetros estadísticos para el sistema de lodos activados .....	74
Tabla 23- Resultados de los tiempos de retención para el sistema de lodos activados.....	74
Tabla 24- Valores obtenidos según el método de Wolf Resnick simplificado para el sistema de lodos activados.....	75
Tabla 25.- Valores obtenidos según el modelo de dispersión y del índice de variación de Levenspiel para el sistema de lodos activados.....	75
Tabla 26.- Resultados del perfil de oxígeno para los sistemas evaluados.....	81
Tabla 27.- Eficiencias de remoción en función del tiempo de carga para los sistemas evaluados.....	90
Tabla 28.- Porcentaje de remoción de DBO en relación los sólidos presentes en los sistemas.....	91
Tabla 29.- Eficiencia de remoción de DQO en los sistemas durante el arranque	92
Tabla 30.- Caudales de operación en los sistemas durante la puesta a punto	95
Tabla 31.- Remoción de la DBO en los sistemas estudiados durante la puesta a punto	101
Tabla 32.- Remoción de la DQO en los sistemas estudiados durante la puesta a punto	102
Tabla 33.- Parámetros de operación en los sistemas durante la primera etapa	105
Tabla 34.- Remoción de la DBO en los sistemas estudiados durante la primera etapa	109
Tabla 35.- Remoción de la DQO en los sistemas estudiados durante la primera etapa	109
Tabla 36.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el afluente de los sistemas empleados durante la estabilización de la primera etapa	110
Tabla 37.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema de lodos activados durante la estabilización de la primera etapa	110
Tabla 38.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema híbrido durante la estabilización de la primera etapa	111

Tabla 39.- Resultados de estabilidad en función de la DBO	111
Tabla 40.- Resultados de estabilidad en función de la DQO	112
Tabla 41.- Cargas aplicadas durante la primera etapa en función de la DBO	113
Tabla 42.- Resultados de la estabilidad en relación de la conversión de nitrógeno amoniacal	113
Tabla 43.- Parámetros de operación en los sistemas durante la segunda etapa	116
Tabla 44.- Remoción de la DBO en los sistemas estudiados durante la segunda etapa	121
Tabla 45.- Remoción de la DQO en los sistemas estudiados durante la segunda etapa	121
Tabla 46.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el afluente de los sistemas empleados durante la estabilización de la segunda etapa	122
Tabla 47.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema de lodos activados durante la estabilización de la segunda etapa	123
Tabla 48.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema híbrido durante la estabilización de la segunda etapa	123
Tabla 49.- Resultados de estabilidad en función de la DBO	124
Tabla 50.- Resultados de estabilidad en función de la DQO	124
Tabla 51.- Cargas aplicadas durante la segunda etapa en función de la DBO	125
Tabla 52.- Resultados de la estabilidad en relación de la conversión de nitrógeno amoniacal	126
Tabla 53.- Parámetros de operación en los sistemas durante la tercera etapa	130
Tabla 54.- Remoción de la DBO en los sistemas estudiados durante la tercera etapa	135
Tabla 55.- Remoción de la DQO en los sistemas estudiados durante la tercera etapa	136
Tabla 56.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el afluente de los sistemas empleados durante la estabilización de la tercera etapa	137
Tabla 57.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema de lodos activados durante la estabilización de la tercera etapa	138

Tabla 58.- Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema híbrido durante la estabilización de la tercera etapa	138
Tabla 59.- Resultados de estabilidad en función de la DBO	139
Tabla 60.- Resultados de estabilidad en función de la DQO	139
Tabla 61.- Cargas aplicadas durante la segunda etapa en función de la DBO	140
Tabla 62.- Resultados de la estabilidad en relación de la conversión de nitrógeno amoniacal	141

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.- Esquema general de un proceso de lodos activados.....	19
Figura N° 2.- Esquema general de un proceso de lodos activados con un medio de soporte para biomasa adherida (sistema híbrido).....	26
Figura N° 3.- Relación entre la carga superficial y el porcentaje de remoción cuando se utiliza el BIONET como medio de soporte.....	35
Figura N° 4.- Bloque del material portador.....	35
Figura N° 5.- Esquema de la vista lateral del sistema híbrido.....	61
Figura N° 6.- Vista de planta del sistema híbrido.....	61
Figura N° 7.- Corte transversal del sedimentador.....	61
Figura N° 8.- Vista lateral y planta del sistema híbrido .....	62
Figura N° 9 Esquema de la vista lateral del lodo activado	62
Figura N° 10.- Vista lateral del sedimentador del lodo actiavdo.....	63
Figura N° 11.- Difusores de aire de burbuja utilizados en los sistemas.....	63
Figura N° 12.- Esquema del sedimentador con una ampliación del sistema airlift del reciclo .....	65
Figura N° 13.- Protectores de seguridad para los compresores y timer.....	65
Figura N° 14.-Vista lateral de los dos tanques.....	66
Figura N° 15.- Ubicación del medio del tanque dentro.....	66
Figura N° 16.- Disposición del sedimentador dentro del tanque.....	67
Figura N° 17.- Vista lateral de la estructura del sedimentador.....	67
Figura N° 18.- Compresores empleados en la evaluación.....	68
Figura N° 19.- Sistemas de difusores de aire (lodos activados).....	68
Figura N° 20.- Sistema de alimentación a los tanques.....	69
Figura N° 21.- Comportamiento de la concentración del trazador a la salida del sistema de lodos activados.....	70
Figura N° 22.- Comportamiento de la concentración del trazador a la salida del	73

sistema híbrido.....	
Figura N° 23.- Evaluación de la influencia de los difusores en le funcionamiento de los sistema evaluados.....	76
Figura N° 24.- Evaluación de la influencia de los difusores y la columna de agua en el funcionamiento de los sistemas.....	77
Figura N° 25.- Curvas de calibración de la velocidad y del caudal de aire en función a la presión manométrica.....	77
Figura N° 26.- Valores de los caudales de aire para el sistema de aireación empleado en el estudio.....	78
Figura N° 27.- Variación del OD en los sistemas durante el período de carga....	79
Figura N° 28.- Variación del pH en los sistemas durante el período de arranque	79
Figura N° 29.- Variación de la temperatura en los sistemas durante el período de arranque.....	80
Figura N° 30.- Diagrama de los puntos para determinar el OD en los sistemas..	81
Figura N° 31.- Esquema del comportamiento típico del OD durante el arranque	82
Figura N° 32.- Gráfico del comportamiento del OD para el sistema híbrido durante el arranque.....	82
Figura N° 33.- Gráfico del comportamiento del OD para el sistema de lodos activados durante el arranque .....	82
Figura N° 34.- Gráfico del comportamiento de los Sólidos Sedimentables y SSVLM para el sistema de lodos activados durante el arranque.....	84
Figura N° 35.- Gráfico de la tasa de crecimiento de los sólidos para el sistema de lodo activado durante el período de arranque.....	85
Figura N° 36.- Gráfico de la pendiente de crecimiento de los sólidos usando una y dos cargas para el sistema lodos activados durante el período de arranque.....	85
Figura N° 37.- Gráfico que presenta la relación entre los Sólidos Sedimentables y los Suspendidos para el sistema de lodo activados durante el primer arranque	86
Figura N° 38.- Fotografía de la biopelícula a los 10 días de inicio de la operación continua.....	87
Figura N° 39.- Fotografía de la biopelícula a los 27 días de inicio de la operación por carga.....	88

Figura N° 40.- Fotografía de los conos de Imhoff a los 15 días de inicio de la operación por carga.....	89
Figura N° 41.- Variación del OD durante la puesta a punto para los sistemas estudiados	93
Figura N° 42.- Variación del pH durante la puesta a punto para los sistemas estudiados	93
Figura N° 43.- Variación del Temperatura durante la puesta a punto para los sistemas estudiados	94
Figura N° 44.- Aspecto de ambos tanques al inicio de la operación en continuo	95
Figura N° 45.- Sólidos Sedimentables al inicio de la operación en continuo	95
Figura N° 46.- Dos vistas de la película durante la puesta a punto de los sistemas	96
Figura N° 47.- Comportamiento de los sólidos en el sistema híbrido durante la puesta a punto	97
Figura N° 48.- Aspecto de los sólidos en el momento que se presenta el máximo de los Sólidos Sedimentables	98
Figura N° 49.- Comportamiento de los sólidos en el sistema lodo durante la puesta a punto	98
Figura N° 50.- Aspecto del lodo sedimentado a los 5 días de operación en continuo	99
Figura N° 51.- Aspecto de la biopelícula durante la estabilización en continuo	100
Figura N° 52.- Variación del OD durante la primera etapa para los sistemas estudiados	103
Figura N° 53.- Variación del pH durante la primera etapa para los sistemas estudiados	103
Figura N° 54.- Variación del Temperatura durante la primera etapa para los sistemas estudiados	104
Figura N° 55.- Comportamiento de los sólidos durante la primera etapa para el sistema híbrido	105
Figura N° 56.- Comportamiento de los sólidos durante la primera etapa para el sistema de lodos activados	106
Figura N° 57.- Imagen de los tanques durante la primera etapa de los sistemas	107



Figura N° 58.- Aspecto de la biopelícula durante la primera etapa	108
Figura N° 59.- Variación del OD durante la segunda etapa para los sistemas estudiados	114
Figura N° 60.- Variación del pH durante la segunda etapa para los sistemas estudiados	115
Figura N° 61.- Variación del Temperatura durante la segunda etapa para los sistemas estudiados	115
Figura N° 62.- Comportamiento de los sólidos durante la segunda etapa para el sistema híbrido	117
Figura N° 63.- Comportamiento de los sólidos durante la segunda etapa para el sistema de lodos activados	118
Figura N° 64.- Aspecto de los tanques durante la segunda etapa de los sistemas	119
Figura N° 65.- Aspecto de la biopelícula durante la segunda etapa	120
Figura N° 66.- Variación del OD durante la tercera etapa para los sistemas estudiados	127
Figura N° 67.- Variación del pH durante la tercera etapa para los sistemas estudiados	128
Figura N° 68.- Variación del Temperatura durante la tercera etapa para los sistemas estudiados	128
Figura N° 69.- Comportamiento de los sólidos durante la tercera etapa para el sistema híbrido	130
Figura N° 70.- Comportamiento de los sólidos durante la tercera etapa para el sistema de lodos activados	132
Figura N° 71.- Aspecto de los sólidos en el efluente durante la tercera etapa en el lodo activado	133
Figura N° 72.- Aspecto de los tanques durante la tercera etapa de los sistemas	134
Figura N° 73.- Aspecto de la biopelícula durante la tercera etapa	134
Figura N° 74.- Eficiencia en función de la carga orgánica aplicada en términos de DBO para el sistema híbrido	142
Figura N° 75.- Eficiencia en función de la carga orgánica aplicada en términos de DQO para el sistema híbrido	142
Figura N° 76.- Comportamiento de la Carga Orgánica Aplicada VS la Carga	143

## Orgánica Eliminada en términos de DBO

Figura N° 77.- Comportamiento de la Carga Orgánica Aplicada VS la Carga Orgánica Eliminada en términos de DQO	144
Figura N° 78.- Eficiencia en función de la carga orgánica aplicada en términos de DBO para el sistema lodos activados	145
Figura N° 79.- Eficiencia en función de la carga orgánica aplicada en términos de DQO para el sistema lodos activados	145
Figura N° 80.- Comportamiento de la Carga Orgánica Aplicada VS la Carga Orgánica Eliminada en términos de DBO	146
Figura N° 81.- Comportamiento de la Carga Orgánica Aplicada VS la Carga Orgánica Eliminada en términos de DQO	146
Figura N° 82.- Relación entre la Eficiencia y la Carga Volumétrica Aplicada en función de la DBO para ambos sistemas	152
Figura n° 83.- Relación entre la Eficiencia y la Carga Volumétrica Aplicada en función de la DQO para ambos sistemas	152
Figura N° 84.- Relación entre la carga eliminada, la eficiencia y el Tiempo de Retención Hidráulico	154
Figura N° 85.- Relación entre el Tiempo Hidráulico la DBO del efluente	155

## LISTA DE SÍMBOLOS

C.O.A = Carga Orgánica Aplicada, (diferentes unidades para ambos sistemas: g DBO/m<sup>2</sup>\*d para el híbrido y kg. DBO/kg SSVLM\*d para el lodo.

C.O.E =Carga Orgánica Aplicada, (diferentes unidades para ambos sistemas: g DBO/m<sup>2</sup>\*d para el híbrido y kg. DBO/kg SSVLM\*d para el lodo.

C.V.A= Carga Volumétrica Aplicada, g DBO/m<sup>3</sup>\*d

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/l

DQO = Demanda Química de Oxígeno, mg/l

F/M = Relación Alimento/Microorganismo, mg/l DBO ó DQO/ mg/l SSVLM\*d

Kd = Coeficiente de decaimiento, d<sup>-1</sup>

OD = Oxígeno disuelto, mg/l

Ox = Requerimientos de Oxígeno, kg/d

SSVLM = Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor de Mezcla, mg/l

SSV= Sólidos Suspendidos Volátiles, mg/l

Q = Caudal del sistema. (l/d)

Qr = Caudal de reciclo en el sistema. (l/d)

Qw= Caudal de purga del sistema. (l/d)

Qe = Caudal del efluente, l/d

Qw = Caudal de purga, l/d

Rm = Requerimientos de aire, m<sup>3</sup>/min

V= Volumen del tanque de aireación. (l)

Xo= Concentración de DBO en el afluente. (mg/l)

Xs= Concentración de DBO en el efluente. (mg/l)

Xr= Concentración de DBO en el reciclo. (mg/l)

X= Concentración de sólidos suspendidos en el licor de mezcla. (mg/l)

SS= Sedimentador secundario del sistema.

θh = Tiempo de retención Hidráulico, h

θc = Tiempo de retención Celular, h

Y = Coeficiente de productividad, mg SSV/mg DQO

Yobs = Crecimiento neto de microorganismos, mg SSV/mg DQO.

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

## 1.- INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tratamiento para aguas residuales municipales pueden ser afectados generalmente por un aumento en los caudales a ser tratados, debido al crecimiento de la población.

Existen diferentes tecnologías para realizar el tratamiento biológico; las cuales permiten obtener las condiciones requeridas para su descarga en cuerpos receptores, pero presentan características operacionales y condiciones de mantenimiento diferentes; así como distintos costos que determinan el tratamiento adecuado en cada caso, según las características fisicoquímicas del líquido residual a tratar y las condiciones de operación y funcionamiento respectivos.<sup>(Crites, 2000)</sup>

Con respecto a los sistemas de tratamiento para áreas rurales y urbanas en los países en vías de desarrollo, el problema es adaptar las soluciones basadas en experiencias obtenidas en países industrializados a las necesidades de estos países. Entonces, la solución adecuada requiere estudios cuidadosos a las condiciones de cada caso. Por esta razón en América Latina en los últimos años, los ingenieros encargados del diseño y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales, promueven investigaciones sobre las tecnologías actuales, a fin de lograr soluciones que se adapten a los requerimientos y necesidades de cada población.

Por tal razón surge como una posible respuesta, el adicionar un medio inerte, elaborado de material sintético como base para la adherencia de la biomasa en los tanques de aireación de los lodos activados ya existentes en las plantas, para lograr un sistema de biopelícula sumergida. Esto aumentará el tiempo de retención del lodo que probablemente se traduce en mayor porcentaje de remoción de materia orgánica. Estos sistemas se conocen como híbridos. En Alemania en 1988, Lessel y sus colaboradores realizan la evaluación de esta tecnología incorporando diferentes medios de soporte en plantas que se encontraban con problemas para mantener la calidad del efluente, luego de un aumento considerable en el caudal de operación. En esta experiencia se logran resultados satisfactorios, por lo cual se inicia el desarrollo de estos sistemas en otros países.<sup>(Lessel, 1991)</sup>

Este sistema combina el proceso de oxigenación por contacto y el proceso tradicional de los lodos activados. Esto quiere decir que el sistema híbrido contiene biomasa tanto suspendida como adherida al medio de soporte y de esta manera, la biomasa activada que realiza el tratamiento es mayor que en el sistema de lodos activados o en los sistemas de biopelícula adherida por separados. El sistema está constituido básicamente por un tanque, el cual contiene en su interior una estructura polimérica rígida, además de un sistema de distribución de aire.

En este contexto, el presente trabajo está dirigido a presentar y comparar bajo igualdad de condiciones un sistema híbrido a escala piloto ( conformado por un sistema de lodos activados y un medio fijo de soporte de polietileno para la biomasa) con un sistema de lodos activados. Esto con el fin de evaluar la eficiencia de los mismos para remover material carbonáceo, a través de la determinación de los parámetros fisicoquímicos tales como: DBO, DQO, sólidos, etc. Además se pretende verificar el funcionamiento de este sistema en climas tropicales, para lo cual no existe información en la literatura publicada hasta el momento. Todo esto, con el fin de contribuir a llenar el vacío que existe con respecto al diseño y operación de estos sistemas, los cuales se han implementado de manera reciente.

Asimismo se pretende lograr un aporte a la investigación a escala piloto de estos sistemas, pues actualmente la información publicada no es suficiente, pues no se refieren las condiciones de operación y la manera mediante la cual se realiza la evaluación. Por lo tanto, los resultados no pueden ser relacionados entre sí para establecer criterios de diseño definitivos a la hora de construir estos sistemas. Además, la mayoría de las pruebas se realizan a gran escala, incorporando el medio a un sistema real presente en una planta, sin establecer parámetros que definan cuando utilizar cada tipo de medio y en que condiciones.

Con este trabajo se pretende verificar esta tecnología como una alternativa viable para la aplicación de plantas existentes, donde no se dispone de recursos físicos y económicos para construir unidades adicionales, para lo cual se plantean los siguientes objetivos generales y específicos.



## **OBJETIVOS GENERALES:**

- 1.** Diseñar un sistema híbrido para el tratamiento de aguas residuales, con medio de soporte plástico BIONET y un sistema de lodos activados.
- 2.** Construir los sistemas señalados mediante la selección de los medios y materiales más apropiados para tal fin.
- 3.** Poner en marcha y comparar el Sistema Híbrido de Biopelícula Sumergido (BIONET) y el Sistema de Lodos Activados a escala piloto, para la remoción de material carbonáceo, proveniente de aguas residuales municipales en climas tropicales como tratamiento.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- 1.** Evaluar el funcionamiento y los requerimientos de operación y mantenimiento del sistema híbrido de bio-película sumergible (bio-net), en clima tropical para la remoción de material carbonáceo.
- 2.** Comparar el sistema híbrido de tratamiento de agua residual con el sistema de lodo activado para la eliminación de material carbonáceo.
- 3.** Determinar las ventajas y desventajas del empleo del sistema híbrido para la remoción de material carbonáceo.
- 4.** Establecer los parámetros de diseño y operación para los sistemas híbridos.

# CAPÍTULO 2

## ANTECEDENTES

## 1.- ANTECEDENTES

A continuación se presentan las experiencias más importantes relacionadas con los sistemas híbridos realizadas en los últimos años. También se presenta una breve descripción sobre las tecnologías implementadas a nivel industrial que utilizan estos nuevos sistemas actualmente, para lograr una visión general del panorama relacionado con las investigaciones orientadas a implementar de forma definitiva estos sistemas como una nueva tecnología.

Los trabajos se reportan mediante el autor, año de publicación y lugar donde se realiza el trabajo, en orden alfabético.

♦ **Hamoda, M, F (1987) Universidad de Kuwait (Kuwait).**

Presenta el desarrollo de un reactor de biopelícula sumergida fija, el medio de soporte son baldosas y la aireación se realiza mediante difusores. Los estudios revelan que el régimen hidráulico del reactor es descrito por un modelo de reactores mezcla completa en serie. El afluente presentaba valores de 900 mg/l en DQO, con cargas hidráulicas hasta de  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  y de cargas orgánicas hasta de  $900 \text{ kg. DQO}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ . El reactor presentó eficiencias de remoción en DQO de 97 % con las cargas más bajas y exhibió un funcionamiento eficiente y estable en las cargas hidráulicas y orgánicas más altas, ya que la velocidad de remoción de sustratos orgánicos y la cantidad de biomasa adherida por área superficial aumenta con el incremento de la carga orgánica. Esto se puede atribuir a la adecuada transferencia de oxígeno y a la cantidad y al tipo de biomasa adherida. La distribución del reactor en cuatro cámaras con las baldosas dispuestas ha demostrado ser eficiente para evitar corto circuitos. Los porcentajes de remoción en DQO para las cargas orgánicas más altas fue de 88 %, con un efluente que presenta valores inferiores a 30mg/l.

♦ **Wanner, K (1988) Praga (Checoslovaquia).**

Este trabajo presenta el estudio en cuatro sistemas de laboratorio del efecto de la biomasa fija en la incidencia de microorganismos filamentosos en el proceso de lodos activados y en la nitrificación. Estos sistemas consisten en tanques mezclados totalmente que contienen partículas de espuma plástica sumergidas, discos plásticos rotativos sumergidos parcialmente y discos plásticos sumergidos completamente, que sirven como

material de soporte para el crecimiento adherido. Además existía una unidad de control con biomasa suspendida solamente. En comparación con el sistema de lodos activados simple donde ocurre el abultamiento filamentoso, la presencia de una biopelícula afectó positivamente las características del lodo activado especialmente en el sistema con las partículas de espuma plástica.

♦ **Rogalla, F. Bacquet, M. (1989) Le Mans, (Francia).**

Este trabajo refiere los resultados de ampliar plantas de tratamiento utilizando elementos sumergidos. En una unidad a escala industrial, se modifica una sección completa de la planta con el empaque de bio-filtro, que funciona en paralelo a una sección similar sin modificar utilizada como referencia. El volumen ocupado por los lechos fijos fue variado entre 20 y 40 % del total del tanque. Los resultados muestran que la biomasa fija disminuye la cantidad de lodo que se produce, aunque no aumenta la capacidad de estabilización del mismo. Sin embargo, la eficiencia de remoción aumenta cuando se emplean cargas más altas en la sección que presenta los elementos sumergidos con respecto a la sección de referencia. Entonces se puede decir que la calidad del efluente se puede mantener aunque se aumenten las cargas y se pueden adaptar así a cargas más altas sin volumen adicional en el tanque. De hecho, se puede aumentar la capacidad volumétrica de 30 a 50 % sin volumen adicional en el tanque. La relación entre el funcionamiento y el volumen agregado de los medios no se puede demostrar claramente, pero un contenido fijo más alto de biomasa da resultados de tratamiento más estables.

♦ **Bonhomme, M. (1990) Le Mans (Francia).**

Se evalúa en este trabajo un sistema BIOFIX, para determinar la capacidad de soportar aumentos de carga orgánica en la alimentación y posteriormente lograr la nitrificación. El medio ocupa 20 % del volumen total de un sistema que originalmente operaba sólo con biomasa suspendida. Se obtienen porcentajes de remoción excelentes (98 %) en DBO, con una relación de reciclaje de 150%. La eficiencia en nitrificación es 93 %. El sistema soporta cargas de 0,4 kg.DBO/kg.SSV\*d.

♦ **Carrand, G. y Capon, A. (1990) Alemania.**

En esta experiencia se implementan dos reactores que utilizan el proceso BIOFOR, el cual transforma un sistema de lodos convencional en un sistema híbrido. Los reactores operan en forma modular, para manipular flujos y adaptarse a cambios en la carga orgánica presente en la alimentación. Se realiza una primera etapa de remoción carbonácea, la cual tiene una eficiencia promedio de remoción de 74 % en DQO y 93 % en remoción de sólidos suspendidos (SS), con cargas promedio de 3,25 kg. DQO/m<sup>3</sup>\*d. Estos resultados se llevan a escala industrial en Ginebra (Suecia). Se logra una eficiencia de 73 % en remoción de DQO, con un promedio de carga aplicada de 9,3 kg.DQO/m<sup>3</sup>\*d y una producción de lodo de 1 kg SS/Kg DBO<sub>5,20</sub> tratado y 90 % de eficiencia en remoción de SS. Se concluye que el proceso híbrido responde a cambios en la carga orgánica presente en la alimentación, se logra disminuir la producción de lodo en comparación con las cantidades que presenta el lodo activado convencional. Además es adaptable a diversas condiciones de operación, lo cual permite su ajuste a condiciones de mayor demanda sin problemas.

♦ **Dillon, G. (1990) Praga (Checoslovaquia).**

Este trabajo muestra como se amplía una planta de tratamiento de aguas residuales mediante la incorporación de la tecnología de biopelícula BIOCARBONE. En el mismo se aplican cargas hidráulicas entre 35-42 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d. y orgánicas entre 4 y 6 kgDBO/m<sup>2</sup>\*d. Los resultados indican que la eficiencia en la remoción de los sólidos suspendidos disminuye de 90 a 83 % y de 95 a 92 % en el caso de la DBO, cuando se aumentan las cargas. La ventaja es que este sistema puede tratar caudales equivalentes a 250.000 personas con un volumen de aproximadamente 50 veces menor que un lodo activado en tales condiciones.

♦ **Orr, P. y Lawty, R. (1990) Nueva Zelanda.**

Se utilizan cuatro reactores con empaque aleatorio de anillos Rashing 250 mm, que se conocen como módulos Flocor. Adicionalmente se cuenta con un pretratamiento (un tanque de pre-sedimentación y pre-aireación) tratamiento secundario (4 sedimentadores). Las cargas hidráulicas manejadas son 0,8 l/m<sup>2</sup>\*s en el medio de soporte y de 71 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d en el sistema. La eficiencia de remoción en DBO es de 85 % y se producen 0,5 Kg SS/Kg DBO removido. A los dos meses de operación presenta problemas de malos olores y alta

acumulación de biomasa, lo cual se resuelve mediante radiaciones especiales. Se concluye, luego de finalizada la experiencia, que estos reactores pueden manejar sin problemas variaciones en carga diurnas muy grandes con poco efecto sobre la eficiencia media de remoción de DQO, la cual alcanza valores promedio de 80 %.

♦ **Sharekh, H.A. Hamoda M.F. (2001) Kuwait.**

Este trabajo reporta los resultados obtenidos usando un sistema híbrido fijo aireado de película sumergida (HASFF). La planta consta de cuatro unidades de 103,5 l que operaron con tiempos retención hidráulica de 2, 4, 6 y 8 h, con una carga orgánica 0,7 g de DBO/g\*d. Se logran con el proceso (HASFF) eficacias globales de remoción en DBO de 94 % para todos los tiempos de retención hidráulica, mientras que el porcentaje de remoción de DQO osciló entre 66-76 %. Al aumentar cuatro veces la carga de 0,08 a 0,32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d, el sistema responde favorablemente, sin disminuciones considerables en la eficiencia de remoción de DBO y DQO, aunque este último responde con mayor lentitud. Esto indica un proceso biológico elástico a cambios en la carga hidráulica, por lo cual constituyen una opción viable para actualizar sistemas de tratamiento de lodo activados con cargas excesivas. Además los procesos (HASFF) presentan problemas operacionales mínimos.

♦ **González-Martínez, S. Duque-Luciano, J. (1992) Ciudad de México (México).**

Reporta la experiencia con cuatro tanques idénticos en serie en la planta experimental de la Universidad Nacional de México. Cada tanque contiene, como empaque, anillos Pall con un área superficial total de 31,3 m<sup>2</sup> colocados sobre los dispositivos de difusión de aire. El reactor fue operado con tres valores de carga orgánica cambiando el caudal de aguas residuales. Se realiza un muestreo para cada carga orgánica durante 3 semanas con una semana de intervalo entre ellas para permitir la adaptación de las comunidades microbianas a las nuevas condiciones. El mismo se inicia 10 semanas después del arranque de la planta. Las muestras eran analizadas para temperatura, pH, alcalinidad, DBO, DQO, amoníaco y sólidos. Se puede concluir que los sistemas de biopelícula sumergidas aerobia son simples y eficientes para el tratamiento de las aguas residuales municipales. Se puede alcanzar valores de DBO en el efluente de menos de 10 mg/l. La biomasa que resulta se establece fácilmente. Se presenta biomasa como crecimiento filamentoso, en su mayor parte, que se adhiere al material del empaque.



◆ **Dickenson Lantec, Products. (2000) Japón**

Este trabajo resume los resultados de utilizar un bioreactor con el proceso CSCF en la Vinería Suntony al norte de Tokio, Japón; para aumentar al doble la capacidad de tratamiento, 1500 mg/l a 3000 mg/l de DBO. La unidad permite aumentar de 0,7 kg. DBO/m<sup>3</sup>\*d la capacidad del lodo convencional presente a 2,2 kg DBO/m<sup>3</sup>\*d, para el proceso empleado. Se logran eficiencias promedio en DBO de 86 %; luego de emplear un coagulante se logra una eficiencia de hasta 98 %. Luego se utiliza en la planta de cartón de Fuji para manejar una carga de 3 kg. DBO/m<sup>3</sup>\*d y se logran eficiencias promedio de 96 %. Se concluye que estos sistemas minimizan la producción en producción de lodo, tienen costos menores que los sistemas convencionales. Lo más importantes es que permiten manejar cargas superiores a los sistemas de lodos activados tradicionales, con eficiencias superiores a 90 % .

◆ **Lessel, T.H. (1994) Munich (Alemania).**

Reporta la experiencia con 3 tipos de empaque: Bionet, Linpor y Ringlace en el oeste de Munich, Alemania. Se utilizan inicialmente para la remoción de material carbonáceo y posteriormente para nitrificación. Los resultados muestran un aumento considerable de SSLM hasta 10 g/l, con índices de lodo inferiores a 50 ml/g. Los medios en la prueba ocupan un promedio de 25 % del volumen total del tanque. En general no se observa formación de lodo anaerobio. Las eficiencias promedio obtenidas son: 85 % para el Bionet, 84% para Linpor y 87 % para el Ringlace, el cual en general presentó los mejores resultados. Los valores llevados a escala industrial con la incorporación de tres reactores con cada tipo de material, permiten obtener valores de remoción de 93 a 97 % en DBO, y de 82 a 90 % en DQO. Además se observa una biomasa fija sobre los materiales a los pocos días y las regeneraciones de la misma son continuas.

◆ **Müller, N. (1998) Pforzheim, (Alemania).**

Reporta la experiencia en siete (7) plantas de aguas residuales en el sur de Alemania, que operan desde los años ochenta. La tecnología de biopelícula aplicada se conoce como "BIO-2-Sludge". Las plantas originalmente fueron diseñadas para remoción de material carbonáceo y luego fueron modificadas con el objeto de lograr la remoción de nitrógeno.

Para este propósito, el tiempo de retención celular se incrementó, mediante la instalación del medio de soporte para la formación de la biopelícula, sin necesidad de ampliar físicamente el reactor. Los resultados muestran una formación adecuada de lodo alcanzando valores de hasta 11 g/l de sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM). Así mismo se evidencia una mejora considerable en la remoción de material carbonáceo, medido mediante DBO y nitrógeno amoniacal. También se observan niveles importantes de nitrificación.

♦ **Tejero, I. (1999) Cantabria (España).**

La Universidad de Cantabria patentó un Reactor de Biopelícula Aireado Fijo Sumergido (BLASF) cuyo relleno consiste en mallas plásticas. El proceso BLASF® consta de un desbaste de rejas, bombeo de agua residual, sistema de desarenado y decantación. Los trabajos desarrollados entre 1995 y 1999 este sistema permite evaluar la adaptabilidad del proceso frente a la variación de cargas orgánicas a través de un sistema de ciclo variable, con un sistema automático de detección de concentración de materia orgánica carbonáceo, con eficiencias de remoción elevadas.

♦ **Schlegel, S. (2000) Essen, (Alemania).**

Presenta los resultados de incorporar medios fijos sumergidos a lodos activados en tres industrias diferentes:

*Fábrica de alimentos:* El medio ocupa un 67,5 % del volumen del tanque. Puede tratar 60 % más que cuando sólo operaba con biomasa suspendida. El sistema aumenta su capacidad de tratamiento de 4,5 kgDQO/m<sup>3</sup>\*d a 6,7 kgDQO/m<sup>3</sup>\*d. La eficiencia de remoción en DQO es de 97 % y la producción de lodo 32 % menor que para el sistema de lodos activados sin medios de soporte fijo. Además en general el efluente contiene valores en DBO de alrededor de sólo 5 mg/l.

*Fábrica de tintes para alfombras:* El medio ocupa 57 % del volumen del tanque. La capacidad de tratamiento aumenta un 50 %. Los valores de DBO son inferiores al 5 mg/l en el efluente y de alrededor de 32 mg/l en DQO.

*Fábrica de medicamentos:* En esta industria se observa una capacidad extraordinaria para soportar cambios en la carga orgánica de 1000 a 8000 mg/l en DQO, logrando resultados de un 90 % en eficiencia de remoción. Además la presencia de los empaques

disminuye la producción de lodo de manera considerable con valores de hasta 75 % menos en algunos momentos de la evaluación.

A continuación se presenta la información de las plantas en Venezuela que trabajan con esta tecnología y utilizan como medio de soporte el Bionet:

♦ **Planta de Tratamiento de aguas servidas. Club Internacional de Guaparo (2002) Valencia, Venezuela.**

La capacidad de esta planta es de 40 m<sup>3</sup>/d. El sistema de tratamiento lo conforma un sedimentador primario seguido de reactor con biopelícula sumergida Bionet. Adicionalmente la planta presenta un sedimentador secundario integrado y un tanque de almacenamiento de agua para riego. Esta planta está operando desde Febrero del año 2002. Los lodos se retiran cada seis meses.

A continuación se presenta las características fisicoquímicas del afluente en el año 2002 como muestra del funcionamiento de este sistema.

Tabla 1. Características Fisicoquímicas de la Planta de Guaparo.

<b>Parámetros</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
pH	6,8	7,2
DBO <sub>5,20</sub> (mg/l)	198	34
DQO (mg/l)	350	104
Nitrógeno Total (mg/l)	22	9.0
Sólidos Totales (mg/l)	400	190
Sólidos Suspendidos (mg/l)	160	18
Sólidos Sedimentables (mg/l)	10	0,5

Fuente: H.O. Ingeniería

◆ **Planta localizada en la Ciudad de Barcelona. Barrio Brisas del Mar (Venezuela).**

La capacidad de esta planta es de 120 m<sup>3</sup>/d. consiste de una estación de bombeo con desbaste, un sedimentador primario, un reactor que emplea como medio el BIONET, con dos etapas, (flujo descendente- ascendente), el sedimentador secundario, digestor de lodos aerobios y los lechos de secado.

◆ **Planta en Construcción. Carretera Jose Barcelona. Urbanización Nuevo Milenio (Barcelona) Venezuela.**

La capacidad de esta planta es de 400 m<sup>3</sup>/d. Esta planta tiene la misma configuración que la anterior, pero se construye en dos etapas, cada una de 200 m<sup>3</sup>/d.

Es notorio que todas estas modalidades de sistemas de biopelícula presentan características diferentes. Adicionalmente se puede observar que en la revisión bibliográfica es muy difícil comparar las experiencias, pues no existe uniformidad de la información. Adicionalmente no se presentan las condiciones en la cuales fueron realizadas las experiencias con detalle. Tampoco se describen especificaciones respecto a las condiciones de estabilidad. Por lo tanto se requiere un estudio más completo y detallado, orientado a definir las condiciones de la situación que se desea evaluar.

Finalmente, el sistema a evaluar corresponde a la tecnología de proceso de biopelícula para crecimiento fijo sumergido, utilizando como medio de soporte el BIONET. Este material es de polietileno, conformado por cilindros con porosidad de 96%, para soportar la biomasa y actualmente se utiliza generalmente para ampliar plantas ya existentes.

# CAPÍTULO 3

## FUNDAMENTOS

### TEÓRICOS

### 3.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A continuación se presentan los conceptos básicos relacionados con los sistemas de tratamiento biológicos de biomasa suspendida y adherida, los parámetros a evaluar para estos sistemas, así como las características de los sistemas híbridos que se desarrollan actualmente en diferentes partes del mundo, además de otros conocimientos que tienen relación directa con el proyecto a realizar.

El gran desarrollo generado, a nivel mundial en los últimos años, ha traído como consecuencia la producción de una gran cantidad de efluentes líquidos provenientes de complejos urbanos e industriales, los cuales son descargados en su mayoría directamente en cuerpos de aguas, tales como ríos, lagos y mares. Estos efluentes en general, resultan altamente contaminantes para estos cuerpos de agua, por lo cual se requiere su tratamiento para reducir al mínimo el impacto sobre éstos. Además, al utilizar un tratamiento eficiente, se puede incrementar las posibilidades de reutilización del agua tratada.

Los sistemas empleados para lograr recuperar las aguas servidas, están constituidos generalmente por una secuencia de unidades tratamiento. Las características de estas unidades dependerán del tipo de tratamiento necesario para dichas aguas. Por ejemplo, cuando hay presencia de material orgánico biodegradable en el agua residual, se puede pensar en utilizar un tratamiento biológico a fin de convertir la materia orgánica soluble y coloidal, en CO<sub>2</sub>, agua y material celular.

Para que cualquier sistema biológico funcione correctamente, debe disponer de nutrientes en cantidades adecuadas. Los nutrientes principales que se requieren son nitrógeno y fósforo. Por lo general, el agua residual municipal contiene todos los nutrientes requeridos para el adecuado crecimiento de las células.<sup>(Metcalf & Eddy, 1991)</sup>

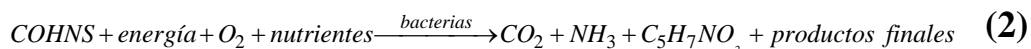
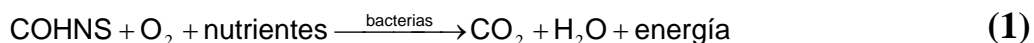
Los tratamientos biológicos pueden ser de tipo aerobio, anaerobio o anóxico, según los requerimientos de oxígeno. Para el caso particular de este trabajo se utiliza un sistema de tipo aerobio. Los procesos aerobios se caracterizan porque la biomasa se desarrolla en un ambiente rico en oxígeno.

En el desarrollo de las reacciones de biodegradación, la materia orgánica se descompone en anhídrido carbónico, agua y energía, además de que los microorganismos aumentan considerablemente su concentración. El proceso en sí de remoción de la materia biodegradable se lleva a cabo en el reactor mediante los siguientes mecanismos esenciales: (Romero Rojas,1999)

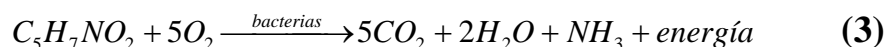
- Adsorción y coagulación de aquellos sólidos suspendidos y coloidales que no hayan sido previamente separados en el tratamiento primario.
- Biosorción, donde la materia orgánica soluble en el líquido residual es inicialmente removida por adsorción y almacenamiento en las células de los organismos responsables de la actividad biológica presente en el reactor.
- Crecimiento del lodo, consecuencia de una asimilación microbiológica a través de sus mecanismos metabólicos de respiración y de síntesis.
- Auto digestión o respiración endógena de las masas microbianas, cuando existe limitación del substrato biodegradable.

Las reacciones que ocurren durante el proceso se pueden presentar de la siguiente manera: (Metcalf & Eddy, 1991)

- **Reacción de Oxidación y Síntesis:** donde el material orgánico se convierte en dióxido de carbono, agua y energía y se forma nuevo material celular



- **Reacción de Respiración Endógena:** donde las células utilizan su propia energía para mantenerse y crecer.



En estas ecuaciones, COHNS representa el material orgánico en el agua residual. La fórmula  $C_5H_7NO_2$ , simboliza el tejido celular y es un valor general obtenido por Hoover y Porges en 1952 a través de estudios experimentales. Los procesos aerobios más utilizados se presentan en la tabla siguiente:

**Tabla 2. - Tipos principales de procesos aerobios**

Tipo	Crecimiento	Proceso	Uso Principal
Aerobio	Suspendido	-Lodos activados ★ convencional ★ mezcla completa ★ aireación escalada ★ estabilización y contacto ★ proceso Kraus ★ zanja de oxidación  -Lagunas aireadas -digestión aerobia -Lagunas aerobias	Remoción de DBO y nitrificación  Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO y estabilización Remoción de DBO y nitrificación
	Adherido	-Filtro percolador ★ alta tasa. ★ baja tasa. ★ torre biológica. -Unidades rotativas de contacto biológico. -Reactores de lecho fijo sumergido	Remoción de DBO y nitrificación  Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO y nitrificación

Fuente: Romero Rojas, (1999)

Los procesos biológicos pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de biomasa presente en: crecimiento en suspensión o crecimiento adherido según la situación de los microorganismos en el tratamiento. En el primer caso los microorganismos se encuentran en suspensión en el líquido de mezcla por efecto de la aireación en el sistema. En el segundo la biomasa se encuentra adherida a un medio de soporte que puede ser de cualquier material según se requiera.

Los procesos aerobios de película fija más comunes que se utilizan incluyen un reactor de lecho empacado con flujo descendente, reactores de lecho empacado de flujo ascendente y reactores de estrato fluidificado de flujo ascendente.

En el caso de este trabajo en particular los sistemas de tratamientos que resultan especialmente importantes para la realización del mismo son: el sistema de lodos activados, los sistemas combinados y los sistemas híbridos.



### 3.1 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

En este tipo de sistema la biomasa que crece se mantiene en suspensión mediante agitación continua y en presencia de oxígeno. El proceso de lodos activados fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Arden y Lockett. Su nombre es debido a que este proceso involucra la producción de masa activa de microorganismos capaces de estabilizar residuos bajo condiciones aerobias.

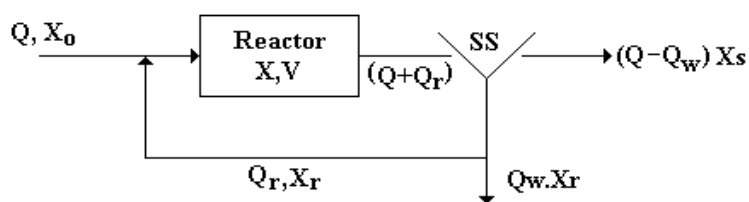
El proceso de lodos activados está conformado básicamente por dos etapas: Una primera etapa de aireación, donde el líquido residual es oxigenado; en esta etapa se llevan a cabo la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica que se encuentra disuelta en el agua residual. Generalmente se lleva a cabo en un tanque, donde el agua residual es aireada, a través de un sistema mecánico o de difusores de aire, que mantienen constante el suministro de oxígeno conforme el líquido se desplaza a lo largo del tanque. El suministro de aire debe ser suficiente para mantener una concentración mínima de oxígeno disuelto en todo el tanque de aireación de 1 a 2 mg. <sup>(Metcalf & Eddy, 1991)</sup>

Seguidamente a la etapa de aireación se lleva a cabo una etapa de clarificación del líquido residual donde la fase líquida es separada de los sólidos floculentos formados en la etapa anterior, la cual se realiza en un tanque diseñado especialmente para tal fin. Parte del material celular contenido en el licor de mezcla en el tanque de separación líquido-sólido debe ser recirculado al tanque de aireación para de esta forma mantener una adecuada población de microorganismos y el sobrante eliminarlo del sistema, mediante la purga. Esto se logra gracias al uso de un sistema de reciclo, para retornar los sólidos provenientes del separador sólido-líquido de regreso al tanque de aireación. El lodo se recircula en una proporción de aproximadamente 25-50 % del caudal afluente.

El grado de eficiencia del tratamiento de lodos activados depende de la formación del floc y de la sedimentabilidad del mismo. Un floc que se aglomera y sedimenta bien por acción de la gravedad, deja un sobrenadante claro como efluente. Los procesos de

lodos activados generan cantidades grandes de biosólidos y requieren supervisión cuidadosa porque son susceptibles a choques causados por cambios súbitos en la carga.

En la Figura N°1 se observa la representación esquemática típica de un proceso de lodos activados. El modelo es conservador y se aplica para cualquiera de las diferentes modalidades bajo las cuales puede operar este sistema



**Figura N° 1:** Esquema general de un proceso de lodos activados

donde:

$Q$ : caudal del sistema. (l/d)

$Q_r$ : Caudal de reciclaje en el sistema. (l/d)

$Q_w$ : Caudal de purga del sistema. (l/d)

$X_o$ : Concentración de DBO en el afluente. (mg/l)

$X_s$ : Concentración de DBO en el efluente. (mg/l)

$X_r$ : Concentración de DBO en el reciclaje. (mg/l)

$X$ : Concentración de sólidos suspendidos en el licor de mezcla. (mg/l)

$V$ : Volumen del tanque de aireación. ( $m^3$ )

SS: Sedimentador secundario del sistema.

### 3.1.1 PARAMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN EN LODOS ACTIVADOS

Para evaluar el funcionamiento de un proceso de lodos activados se deben considerar algunos parámetros importantes: el tiempo de retención hidráulico, la relación sustrato microorganismo, el tiempo de retención celular, así como la purga y recirculación de lodos. (Metcalf & Eddy, 1991)

♦ **Tiempo hidráulico:** Es el tiempo necesario para que el líquido residual permanezca en el tanque de aireación. Los cambios en los tiempos de retención hidráulico cambian la actividad biológica. Por ejemplo, disminuir el tiempo de

residencia hidráulico afecta negativamente la nitrificación y la remoción de la DBO soluble y coloidal. Además se espera un efluente con una mayor DBO. Por el contrario, los tiempos de residencia hidráulicos mayores favorecen los procesos mencionados anteriormente y se espera un efluente de una DBO baja. Sin embargo, tiempos hidráulicos muy grandes, implican tanques de gran tamaño, que impactan considerablemente en los costos de construcción. (Gerardi,2002)

Se expresa como una relación entre el volumen del reactor y el flujo volumétrico de entrada. Se calcula de la manera siguiente:

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

Donde:

$\theta_h$  = Tiempo de retención hidráulico. ( h)

♦ **Relación Sustrato-Microorganismo:** Es la relación entre la cantidad de materia orgánica en el proceso y los microorganismos presentes en el mismo. Se expresa en masa de DBO eliminado en un día por masa de biomasa presente en el licor de mezcla. Por lo tanto, este es un factor determinante de la calidad del efluente, lo cual implica que es un parámetro muy importante en el control de un proceso de este tipo. (Jácome, 2002) Para cada modalidad de lodos activados en particular existe un rango de relación sustrato-microorganismo en los cuales el sistema opera mejor. Este rango puede variar por cambios en los factores que afectan la operación del sistema.

Se expresa como:

$$\frac{\text{masa DBO}}{\text{masa SSVLM} * d}$$

Se calcula como:

$$\frac{F}{M} = \frac{Q * X_o}{V * X}$$

Donde:

F/M: Relación sustrato- microorganismo. (adim)

♦ **Tiempo de residencia celular:** Es la cantidad de tiempo, en días, que permanecen los microorganismos (sólidos suspendidos volátiles) en el sistema. Para calcular este parámetro se necesita conocer tanto la cantidad de sólidos suspendidos en el sistema como la cantidad de los mismos que se descargan. La relación teórica se define de la manera siguiente:

$$\theta_c = \frac{\text{masa celular en el reactor}}{\text{masa celular extraída por día}}$$

La ecuación general para calcular este parámetro es:

$$\theta_c = \frac{V * X}{Q_w * X_r + Q_e * X_s}$$

Donde:

Q<sub>e</sub>: Caudal del efluente (l/d) <sup>(Metcalf & Eddy, 1991; Pérez, 2001)</sup>

En general, con tiempos de residencia celular mayores la producción de lodos es menor, porque el alimento es escaso y los organismos evolucionan a la fase de respiración endógena. Sin embargo, en este caso, se requiere una mayor cantidad de oxígeno, con valores de tiempo de residencia celular menores, la tasa de crecimiento es mayor y el uso de oxígeno más eficiente. El inconveniente principal es que la producción de lodos aumenta. <sup>(Romero Rojas, 1999)</sup>

♦ **Recirculación de lodo:** La finalidad de recircular el lodo al sistema es mantener una concentración suficiente de microorganismos en el tanque de aireación, de modo que pueda obtenerse la eficiencia deseada en el tratamiento. La recirculación de lodo constituye una característica esencial del proceso de lodos activados. <sup>(Metcalf & Eddy, 1991)</sup>

En un sistema de lodos activados es complicado determinar el momento más oportuno para realizar la recirculación, así como la relación óptima de la misma. En general, no es recomendable emplear un tiempo excesivo de retención para el lodo, pues las bacterias envejecen y no pueden realizar de manera eficiente su trabajo. Las

condiciones de recirculación, se determinan en la operación específica del proceso de lodos activados, de manera de obtener la mayor eficiencia de remoción.

♦ **Purga del lodo:** Para mantener un nivel constante de sólidos solubles en el licor de mezcla (SSLM) y un tiempo de retención celular constante en el sistema, es preciso eliminar cierta cantidad de lodos. Esta cantidad eliminada se conoce como purga y puede ser retirada del tanque de aireación directamente o del tanque de sedimentación.

Si la purga se realiza directamente del reactor, el caudal se determina de la siguiente manera:

$$Q_w = \frac{V}{\theta_c}$$

Si, por el contrario, la purga es llevada a cabo en el reciclo, el caudal se determina del modo siguiente:

$$Q_w = \frac{V * X}{\theta_c * X_R}$$

Cuando la purga se realiza directamente del reciclo, el caudal a extraer es menor por estar este más concentrado que cuando se descarga directamente del reactor. (Metcalf & Eddy, 1991)

### **3.1.2 PROBLEMAS EN LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS** (Romero Rojas, 1999; Metcalf & Eddy, 1991)

Existen algunos posibles problemas que puede presentar un lodo activado cuando es operado. Estos problemas generalmente se presentan en el período de arranque y requieren ser solucionados lo más rápido y eficientemente posible a fin de que el crecimiento de la biomasa necesaria para el tratamiento ocurra de tal manera que se logre un efluente altamente clarificado. Entre los problemas más comunes que evitan un buen proceso de sedimentabilidad, se encuentran el abultamiento del floc y la formación de espumas.

En muchas ocasiones, las plantas de tratamiento desarrollan biomasa con una pobre capacidad de sedimentabilidad, debido a que el floc biológico expande su volumen, disminuye su densidad, lo cual reduce la velocidad de asentamiento. Estos

lodos que se sedimentan y compactan muy lentamente, son la causa del problema conocido como abultamiento de lodos (sludge bulking). Además, algunas plantas de tratamiento de lodos activados presentan el problema de formación de natas, de lodos espumosos o espuma abundante, especialmente en el tanque de aireación. Los problemas de abultamiento de lodos y de formación de espuma son muy comunes en plantas de lodos activados que no satisfacen los rendimientos solicitados para un sistema de tratamiento secundario de aguas residuales. La presencia de agentes y organismos espumantes producen una nata viscosa, de color marrón claro y difícil de romper. Generalmente se desaparecen por acción mecánica (chorros de agua) mediante el uso de antiespumantes. El problema más grave lo representan las capas muy gruesas de hasta 1 ó 2 mm de espesor en el tanque de aireación, lo cual trae como consecuencia la producción de malos olores y espuma tanto en el sedimentador secundario como en el efluente de la planta de tratamiento.

Básicamente, la causa del problema de abultamiento es la presencia en el floc biológico de cantidades excesivas de bacterias filamentosas y hongos. Una cantidad excesiva de organismos filamentosos mantiene separadas las partículas floculentas, lo cual conduce a una estructura de floc abierta, de forma irregular, con muchos vacíos entre los filamentos. Sin embargo, una cantidad pequeña de organismos filamentosos es recomendable porque sirve como columna vertebral para la estructura del floc y para retener pequeñas partículas durante la sedimentación. También favorece el crecimiento de organismos filamentosos factores tales como la carencia de una concentración apropiada de oxígeno disuelto, insuficiencia de nutrientes, concentraciones excesivas de H<sub>2</sub>S, concentraciones altas de grasas y ácidos grasos en el agua, pH menor de 6,5 o mayor de 8,5; temperatura excesiva del agua residual cruda, relación alimento/microorganismos (F/M) baja. Además, una agitación excesiva puede producir la ruptura del floc biológico. Por último, la existencia de una relación alimento/microorganismos alta puede desarrollar un crecimiento biológico disperso.

Existen otros inconvenientes relacionados con el proceso de lodos activados, sin embargo, éstas se deben a las limitaciones que presenta el lodo como tratamiento biológico. Estas limitaciones algunas son comunes a todos los sistemas, como por

ejemplo, que pueden manejar una máxima carga hidráulica y orgánica, para la cual se diseñan y al requerir una capacidad mayor se debe proporcionar una unidad adicional. Sin embargo, las nuevas necesidades involucran en el caso particular del lodo, costos adicionales relacionados con gastos de construcción, operación y mantenimiento, que pueden ser más elevados que en el caso de otras tecnologías alternativas.

Adicionalmente el proceso de lodos activados presenta la característica de ser sensible a los cambios bruscos en la alimentación al sistema. Estas variaciones bruscas en el afluente pueden traer como consecuencia una disminución de la calidad del efluente. En los últimos años, se han tratado de incorporar algunas mejoras a estos sistemas, ya sea combinando dos tecnologías existentes de tratamiento biológico o creando sistemas híbridos, los cuales combinan en el mismo sistema biomasa suspendida y adherida, para evitar tener que disponer de un sistema adicional.

### 3.2. SISTEMAS COMBINADOS (Metcalf and Eddy, 2003).

Este tipo de sistemas presentan como característica primordial la presencia de dos reactores en serie, generalmente una combinación de dos unidades de tratamiento diferentes. Entre los sistemas combinados más empleados se puede mencionar:

- **Lodos activados- lecho biopercolador:** sistema que combina la simplicidad de operación y la estabilidad del proceso de crecimiento adherido, con la alta calidad del efluente obtenido con el proceso de crecimiento suspendido. Soporta alrededor de 3 veces la carga del lecho percolador.
- **Biofiltro activado:** semejante a un sistema de lecho percolador de alta tasa, pero implementa la recirculación de lodos al percolador. Soporta alrededor de 5 veces más carga que el percolador tradicional.
- **Lodo activado-contactador de sólidos:** sistema formado por un filtro percolador, seguido de un tanque de contacto de sólidos y un sedimentador.

Posteriormente se diseñan sistemas que combinan estos fundamentos pero en la misma unidad, los sistemas híbridos.

### **3.3. SISTEMAS HÍBRIDOS** (Metcalf & Eddy, 2003).

Estos sistemas constituyen una mejora al planteamiento anterior, pues presentan en una misma unidad las características de dos tecnologías diferentes. Es decir, presentan crecimiento de biomasa suspendida y adherida, para lograr combinar, en la medida de lo posible, las ventajas de ambos tipos de crecimiento biológico. Los sistemas híbridos tienen como finalidad ampliar un proceso existente proporcionando una mayor concentración de biomasa en el tanque de aireación y ofrecer así una reducción potencial de los requisitos de tamaño del tanque. Debido a la complejidad del proceso y los problemas relacionados con la comprensión de la actividad de la biopelícula, los diseños de estos procesos son empíricos y basados en la instalación de un modelo anterior o en los resultados a escala real, los cuales actualmente son limitados. Por tal razón, requiere ampliar los estudios al respecto para establecer parámetros confiables de diseño. Actualmente existen más de 10 procesos diferentes, en los cuales un material de empaque de varios tipos se suspende en el tanque de aireación de un proceso de lodos activados.

En los sistemas híbridos la DBO y/o el nitrógeno amoniacal es removido por oxidación. Este proceso ocurre mientras el flujo de líquido pasa simultáneamente a través tanto de la biopelícula como de la suspensión presente en el sistema. El oxígeno es proporcionado por aireación difundida en el tanque.

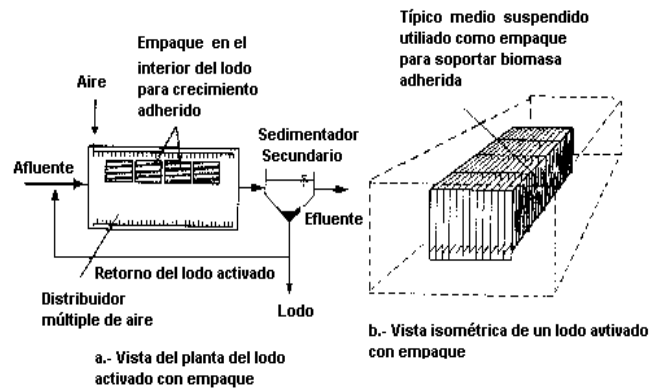
Generalmente, no se utiliza ninguna clarificación con procesos de crecimiento sumergido adherido aerobio y el exceso de sólidos de crecimiento de la biomasa y sólidos suspendidos en el afluente se atrapan en el sistema y deben ser removidos periódicamente, mediante un sistema de purga.

Las ventajas principales de los procesos de crecimiento adherido sumergido es que requieren un espacio relativamente pequeño, tienen la capacidad de tratar



eficientemente aguas residuales diluidas, no tienen problemas de estabilización del lodo como en el proceso de lodos activados. (Hao Chen, Huang, 1997)

En la Figura N°2 se puede observar el esquema típico de un sistema de crecimiento adherido y suspendido, implementado en un reactor de lodos activados característico. El tipo y tamaño del empaque es un factor importante que incide en las características de funcionamiento y el desempeño de los procesos de crecimiento sumergido adherido. Los diseños se diferencian por la configuración del empaque y la distribución del flujo de la entrada y de salida.



**Figura N° 2:** Esquema general de un proceso de lodos activados con un medio de soporte para biomasa adherida (sistema híbrido)

Es importante mencionar que en la Figura N°2 se presenta el esquema con reciclo. En este aspecto existen diferentes opiniones: algunos consideran que en altas cargas el reciclo contribuye a obstruir el medio. Sin embargo, para que el sistema sea híbrido se requiere la presencia del reciclo, de lo contrario el sistema es simplemente un lecho aireado sumergido. (Jácome, 2001b) Se considera en ambos casos que el exceso de biopelícula se desprende y pasa al sedimentador secundario, donde debe retirarse periódicamente.

### 3.3.1. PARAMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO

A continuación se presentan los posibles parámetros para el diseño de estos sistemas. (Schlegel, S Teichgraber, 2000; Müller., 1998)

- **Dimensionamiento** Es importante mencionar que no existen criterios establecidos para realizar un diseño apropiado, ya que existe un gran número de factores asociados al

diseño de lechos sumergidos, muchos de ellos son comunes al diseño general de procesos de tratamiento biológico. Se ha comprobado que se deben considerar varios parámetros para lograr un sistema que cubra las expectativas. Los más importantes son los siguientes:

- El material del soporte de la biopelícula, así como las propiedades del mismo y su ubicación en el tanque.
- El cociente entre el volumen del medio de soporte de la biopelícula con respecto al volumen total del reactor.
- La cantidad específica de biomasa de la biopelícula por unidad del medio de soporte de la misma.
- La calidad del agua residual y el efecto del pretratamiento sobre ésta.
- Carga orgánica aplicada al lecho.
- Equipo de aireación (tipo y ubicación de los mismos).
- La velocidad del flujo de recirculación.
- La posible producción de lodo.
- Las instalaciones para eliminación de lodo.

De estos parámetros se puede considerar que para un diseño eficiente a escala piloto los más importantes a considerar son: las propiedades del medio, el cociente entre el volumen del medio y el del tanque, la producción de lodo y la carga orgánica a aplicar en el sistema. Estos parámetros junto con el volumen del reactor son muy importantes también en la operación de estos sistemas. (Guang Hao Chen y col. (1997)

- **Propiedades del medio soporte** En principio es deseable una gran adherencia de la biopelícula al soporte, aunque esto puede traer consigo problemas de atascamiento por sobre acumulación de biopelícula, o presentar dificultades para el desprendimiento durante el lavado. Los factores que influyen sobre la adherencia son entre otros: forma y rugosidad superficial (factores físicos), estructura microscópica, composición elemental, carga eléctrica, el material del soporte (factores físico-químicos), y el agua en contacto con el medio soporte. (Müller, 1998)

Entre los factores asociados con las características hidráulicas del relleno de lecho están la porosidad y el área superficial específica de relleno. La porosidad afecta directamente al tiempo de retención hidráulica y la pérdida de carga a lo largo del lecho decrece con la porosidad del relleno. Más aún, una elevada porosidad del material utilizado para la fabricación del medio trae como resultado una reducción en el costo del mismo. <sup>(Jácome, 2002)</sup>

La superficie específica controla la cantidad de biopelícula que es capaz de mantenerse por unidad de volumen de lecho. Un lecho de gran superficie específica implica una mejor eliminación de sólidos suspendidos, pero también hace que las pérdidas de carga sean mayores por atascamiento y por tanto que se requiera más energía para hacer pasar el agua a través del lecho a una cierta velocidad. El requerimiento de retrolavados es mayor si el relleno tiene una gran superficie específica, conllevando la eliminación de protozoos y micrometazoos causando un recorte de la cadena trófica y un incremento de la producción de lodos. El área superficial específica del medio soporte usado para un lecho sumergido fijo no suele exceder de  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

- **Cociente del volumen del reactor** Para conseguir una cierta cantidad de biomasa fija de película, es indispensable considerar el cociente apropiado de volumen del medio con respecto al volumen del reactor. <sup>(Müller, 1998)</sup> El cociente del volumen del reactor lleno con los portadores de biopelícula se extiende generalmente entre 18% y 28%. <sup>(Lessel, 1991)</sup> Los cocientes puestos en ejecución en las plantas en Alemania Meridional se extienden entre 16% y 26%. Los resultados de una serie de pruebas consideradas demostraron que la purificación no mejoró cuando el cociente fue más elevado. <sup>(Eberhardt et al., 1984).</sup>

- **Carga orgánica** Actualmente la carga de trabajo aplicada se determina sobre una base volumétrica en la mayoría de los casos. Aunque teóricamente tal procedimiento de diseño parece no ser válido (si la superficie específica del soporte es variante en teoría la base de diseño debería ser la unidad de área superficial del relleno), desde un punto de vista práctico es efectivo. La razón: Si una elevada carga volumétrica se aplica sobre la base de una gran superficie específica de material de soporte, el lecho se

atascará rápidamente y mantener la carga de diseño será imposible en corto tiempo debido a la sobre acumulación de biomasa. De este modo, entre las consideraciones del diseño hay que dar prioridad al atascamiento del lecho sobre la capacidad de tratamiento real u original del lecho. (MICROBAC, 2002)

En definitiva, la carga orgánica óptima se determina en función del atascamiento del lecho. Una guía sobre las cargas volumétricas para reactores de lecho sumergido aireados se da en la tabla siguiente:

**Tabla. 3 - Cargas orgánicas típicas para medios de soporte sumergidos**

<b>Tipo de lecho sumergido.</b>	<b>Carga orgánica (kgDBO/m<sup>3</sup>*d)</b>
Lecho fijo sumergido convencional-medio grueso	0,1 –1,0
Lecho medio fino	0,1–5,0
Lecho fluidizado (medio fino)	1,0–10,0

Fuente: Jácome, 2001a

Otro aspecto importante a considerar para realizar un diseño ajustado a las necesidades de cada caso, es la cantidad de lodo a producir en el sistema que se piensa diseñar.

- **Producción de lodo** (Müller, 1998) Los procesos de biopelícula, incluidos los lechos sumergidos, producen pequeñas cantidades de lodo debido a las largas cadenas alimenticias que viven en ellos. Esto se reconoce como una gran ventaja dentro del tratamiento biológico de aguas residuales. La producción de lodo de una planta de tratamiento experimental que emplea un lecho sumergido aireado de tres etapas es de 0.18 kgSSV/kg DBO eliminado (Iwai et al., 1994) lo cual es de 1/3 a 1/4 de la producción en los sistemas de lodos activados, para una carga volumétrica de 0.47 kg. DBO/m<sup>3</sup>/d.
- **Eficiencia del sistema híbrido** En estos sistemas es importante para determinar la eficiencia y evaluar los resultados obtenidos, considerar las particularidades de cada sistema. Esto se debe a que cuando se utiliza para aumentar la capacidad de plantas ya

existentes, las restricciones son diferentes a cuando se inicia la operación del sistema como híbrido desde el inicio.

La ventaja principal de la adición de los portadores de la película es la capacidad de retener bastante lodo dentro del sistema y permitir una mayor remoción de la DBO. La aplicación de la tecnología híbrida persigue obtener una concentración de biomasa suficiente en el reactor. La eliminación de DBO no representa ningún problema en estas condiciones. (Müller, 1998)

Para determinar la eficiencia y los valores de diseño, se debe conocer la cantidad de biomasa fija a los portadores. La mayoría de los métodos usados para la determinación de la cantidad total de biopelícula se caracterizan por alto consumo de tiempo, son imprecisos, o tienen un procedimiento muy complejo (Lazarova, 1994). Se supone que, cuando se incorpora el medio al sistema de lodos activados, la misma cantidad de lodo que se encuentra en el sistema se fija a los portadores. La cantidad total presente se estima entre 0,5 y 1,5 kg/m<sup>3</sup> del volumen total del reactor.

La fracción orgánica del lodo suspendido en los sistemas híbridos es más baja que para el lodo suspendido normal. Esto se atribuye a que la biomasa adherida a la biopelícula presenta una mineralización más alta, debido a un tiempo de retención mayor en el reactor. Los sólidos suspendidos volátiles se extienden entre 60 % y 75 % de SSML.

Es necesario considerar todos estos aspectos al evaluar la eficiencia global del sistema a ser estudiado. Los criterios comunes para evaluar la eficiencia es a través de los parámetros característicos como DBO, DQO y SS. En general se esperan los rangos de eficiencia en la tabla N° 4 para los parámetros mencionados.

**Tabla 4.-** Eficiencia esperada en los sistemas de lechos sumergido aireado sumergido

<b>Parámetro</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	≥ 95 %
DQO	≥ 80 %

Fuente: CLEAN AND WATER BIOTEQ (2002)

### 3.3.2. MEDIOS DE SOPORTE PARA SISTEMAS HÍBRIDOS <sup>(Jácome, 2001a)</sup>

En estos sistemas pueden usarse diferentes tipos de medios: granulados sin forma (rocas), con forma (anillos Rasching), placas de diferentes materiales, cuerdas, varas, bloques porosos regulares (tubos plásticos unidos) etc. En este trabajo se utiliza un medio con estas últimas características.

#### **Características generales de un medio de soporte**

A continuación se presentan las características que debe poseer un material de soporte apropiado:

- a. Grado apropiado de adherencia para la biopelícula.
- b. Gran superficie específica.
- c. Elevada porosidad individual y en conjunto para el relleno.
- d. Escasa resistencia al flujo de agua.
- e. Estabilidad química y biológica además de elevada resistencia a los cambios de calidad.
- f. Suficiente resistencia mecánica al pandeo, destrucción, abrasión, y suficiente durabilidad.
- g. Elevada capacidad para atrapar los sólidos en suspensión.
- h. Tamaño granular uniforme o espaciamiento uniforme de placas, que permita uniformidad del flujo a través del lecho.
- i. Inerte.
- j. Gravedad específica muy similar a la del agua, que no provoque una carga pesada sobre las estructuras sumergidas o sobre el fondo del tanque.
- k. Bajo costo y suministro estable.
- l. Fácil de transportar, fabricar y construir (montaje).

Ningún medio satisface todas estas características, porque dos o más de ellos son contrapuestos. Por ejemplo, incrementar el espesor de las placas para satisfacer el requisito f. no es ventajoso para el c. k., etc. Por tanto, la selección de las características

finales depende del propósito del tratamiento, de las restricciones del diseño y del mantenimiento de la planta.

En la actualidad, existen diferentes medios de soporte, de materiales diferentes que intentan satisfacer las necesidades de estos procesos, de acuerdo a sus diferentes aplicaciones. En el presente trabajo se utiliza el Bionet, empaque cuyas características se presentan a continuación:

- **Bionet:**

La información que se presenta sobre este empaque es suministrada por la compañía alemana NSW-Umwelttechnik, primera en comercializar el medio.<sup>1</sup>

Este medio está constituido por tubos verticales de PE con una estructura reticular, soldados para formar bloques rectangulares. Las características generales de este tipo de empaque se muestran a continuación:

**Tabla 5.-** Características de empaque tipo Bionet para remoción de DBO

(%) de Huecos	96
Área superficial (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	100
Área superficial activa biológica (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	Sobre los 120
Material	Polietileno negro de alta densidad
Estructura	Cilíndrica reticular, abierta y tridimensional
Tamaños disponibles	(100, 150 y 200) m <sup>2</sup> por m <sup>3</sup>
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	38

Fuente: (NSW-Umwelttechnik, 2001).

- **Ventajas del Bionet como medio de soporte en sistemas híbridos**

Las ventajas que proporciona el bionet como medio de soporte son: Diversidad biológica, (pues en el medio conviven en armonía una gran variedad de

<sup>1</sup> La empresa HO INGENIERIA C.A adquiere el medio a través de NSW-LLC de Estados Unidos. Esta empresa de E.E.U.U. no pertenece ya al fabricante alemán original (NSW-Umwelttechnik) pues fue vendida hace dos años aproximadamente. Actualmente se conoce al Bionet como Kompact®, por cuestiones de patente. Sin embargo, el nombre de Bionet se utiliza indistintamente.

microorganismos), elevado tiempo de residencia celular; (ya que los microorganismos están adheridos al medio un tiempo bastante prolongado), degradación biológica independiente del régimen hidráulico y permite implementar un diseño simple, de alta eficiencia.

Es importante mencionar que las características de la biopelícula formada varían ligeramente de acuerdo al medio que se utilice en cada caso particular, debido a que propiedades como la rugosidad y porosidad del material empleado determinan las características de los microorganismos que se establecen sobre la superficie de la película. En el caso del bionet los microorganismos que aparecen presentan elevada estabilidad, la composición de la biomasa presente permite un tratamiento eficiente, además de la capacidad de amortiguar cambios bruscos en los parámetros de diseño y resistencia a cargas tóxicas.

- **Criterios de configuración a considerar cuando se utiliza Bionet en un sistema de lecho fijo.**

**Material de contacto:** el Polietileno, material con el cual está construida la matriz de soporte, permite un contacto prolongado de la película con el líquido residual, lo cual se traduce en mayor capacidad para tratar el líquido residual.

**Construcción del soporte:** si se considera el área superficial recomendada por el fabricante de acuerdo a la carga de materia carbonácea que se desea aplicar al sistema, cuyos valores se pueden apreciar en la tabla 6, la configuración dada al medio le permite soportar los cambios en las condiciones de entrada. Además si se le incorpora a un sistema que ya opera, la interferencia es mínima en las condiciones iniciales de operación del mismo. En la misma tabla se presentan las cargas orgánicas que se deben aplicar que recomienda el fabricante, según la aplicación que se desee dar al empaque, para lograr una alta eficiencia.



**Tabla. 6** - Carga aplicada por unidad de superficie para las diferentes aplicaciones de empaque de lecho fijo BIONET

Aplicación del medio	Carga orgánica aplicada g DBO/(m <sup>2</sup> *d)
Solamente degradación de material carbonáceo	8-12
Degradación de material carbonáceo incluyendo simultáneamente nitrificación parcial	4-8
Degradación carbonácea incluyendo simultáneamente eliminación completa de nitrógeno	2-4
Solamente nitrificación	1-2
Solamente desnitrificación	2-4

Fuente: NSW-. Umwelttechnik, (2001)

**Aireación:** para lograr las condiciones mencionadas anteriormente se debe proporcionar oxígeno suficiente para que ocurra la degradación, lo cual se logra mediante agitación continua. (NSW-Umwelttechnik). Es importante señalar que el OD disuelto en el sistema debe ser tal que permita que la película sobre el medio no sea muy densa, pues de ocurrir esto predominan las condiciones anaerobias en la película y el sistema disminuye su eficiencia. En algunos casos mantener esta condición puede llegar a ser costoso debido a los requerimientos de flujo de aire que presenta el sistema.

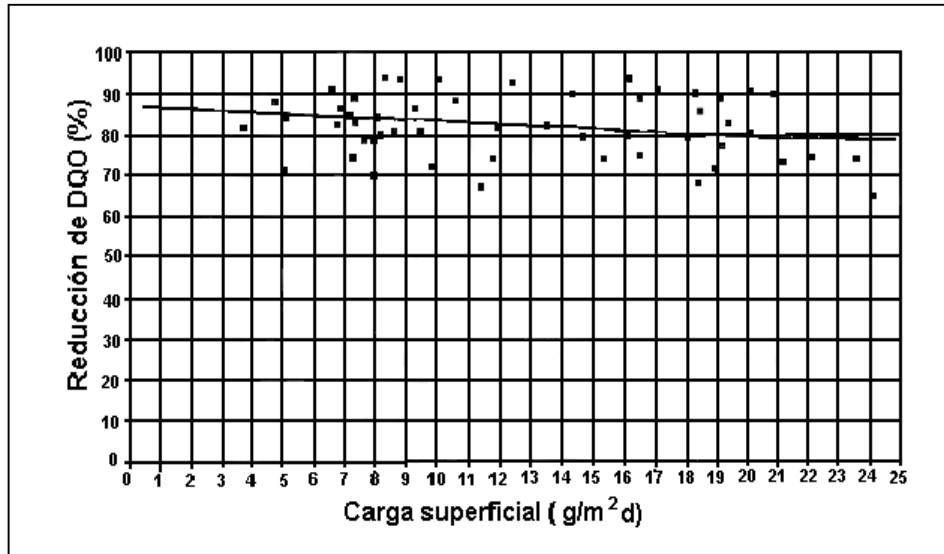
Se aprecia en la tabla 7 que para obtener los resultados deseados se debe trabajar en un rango específico de carga, de acuerdo a la aplicación del medio. La aplicación del medio fuera de estos rangos de carga, ya sea por encima o por debajo del mismo, no garantiza que la eficiencia del sistema sea la representativa de su funcionamiento. Es decir, fuera de sus parámetros óptimos de operación, el sistema no responde adecuadamente.

**Tabla 7.-** Recomendaciones para el área superficial específica instalada cuando se utiliza el BIONET

Carga carbonácea recomendada (g DBO/m <sup>2</sup> *d)	Área superficial recomendada (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
> 12	100
4-12	150
< 4	200

Fuente: (NSW-Umwelttechnik).

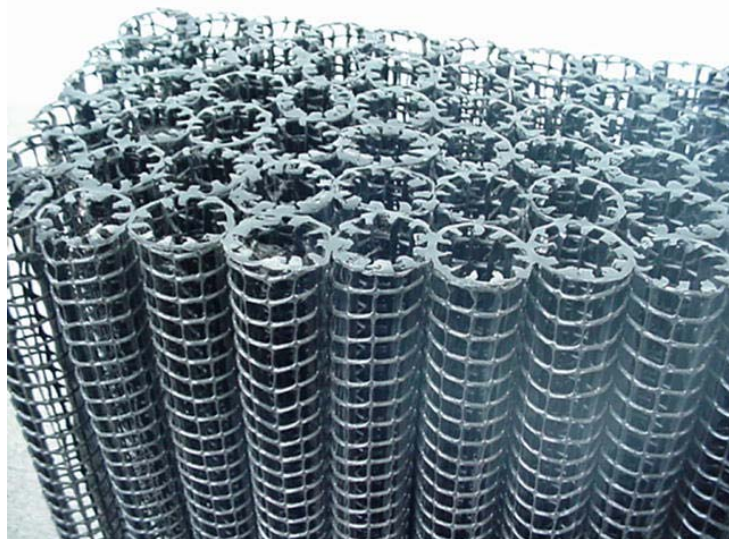
En la Figura N°3 se observa el porcentaje de remoción que se espera en un sistema que utiliza bionet en función de la carga orgánica aplicada al mismo, DQO en este caso.



**Figura N° 3** Relación entre la carga superficial y el porcentaje de remoción cuando se utiliza el bionet como medio de soporte.

Se aprecia claramente que la eficiencia apenas disminuye a medida que aumenta la carga aplicada, lo cual implica una gran capacidad de soportar aumentos bruscos en la carga aplicada.

En la figura 4 se presenta la matriz de soporte empleada en este trabajo. En dicha imagen se pueden apreciar las estructuras huecas que caracterizan a la matriz que conforma el BIONET. Los cilindros huecos se unen fácilmente para formar una unidad que posea el área que se desea



**Figura N° 4** Bloque del material portador

para el tratamiento.

### **3.3.3. MEJORA DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CON BIOMASA ADHERIDA FIJA SUMERGIDA** (Sharek, H.A, 2001).

Un sistema de lecho sumergido convencional incluye una cámara de sedimentación para eliminar los sólidos en suspensión y mejorar así la calidad del efluente final. Es importante mencionar que los lodos sedimentados no se reciclan al lecho. No obstante, ha sido desarrollado un sistema combinado de lecho sumergido y lodos activados en el que el lodo sedimentado es reciclado al lecho, el cual se conoce como híbrido. Un uso eficiente de ambos tipos de biomasa: fija y en suspensión, no solo aumenta la eficiencia del tratamiento sino que también causa los siguientes efectos desde el punto de vista de la mejora del proceso de lodos activados: (Müller, 1998, MBR BIOREACTOR, 2002)

1. Disminución de la producción de sólidos: Como la biomasa de la biopelícula es mucho más diversa que la de los lodos activados y en ella conviven las especies más elevadas de la cadena trófica, la coexistencia de estos microorganismos reduce la excesiva producción de lodos. La microfauna presente, demanda mayor cantidad de alimento, por lo cual ingiere el material celular presente (vivo o muerto), lo cual contribuye a clarificar el efluente. En general se espera un volumen de lodo 70 % menor que en los procedimientos convencionales. En los sistemas tradicionales se producen normalmente 1,5-3 litros lodo/persona\*día. Estos sistemas reducen estos valores a 0.75 litros/persona \*día, lo cual implica un costo menor en la disposición y manejo del lodo.
2. Mejores características en el lodo: Al incorporar biomasa fija a un sistema de lodos activados se mejora la sedimentabilidad y densidad de los lodos. La razón no es clara, pero posiblemente la micro-fauna de la película depreda las bacterias filamentosas u hongos, cuyo crecimiento frecuentemente provoca el aumento del IVL o "bulking" -valor extremo del IVL- de los lodos activados.
3. Arranque más rápido: El proceso combinado es significativamente más rápido de poner en marcha (arranque) que el proceso de lodos activados convencional, lo cual se debe a que la aparición de la biopelícula ocurre rápidamente, por lo tanto,

estos sistemas presentan mayor facilidad para formar biomasa y esto permite que su puesta en marcha sea más rápida y sencilla que en el caso de los sistemas de lodos activados convencional.

4. Requerimientos de aire: La cantidad de aire requerido para lograr una velocidad tal que permita un contacto efectivo entre el líquido y la biopelícula es mayor que el requerido estequiométricamente. Sin embargo, si se suministran adecuadamente los requerimientos de aire, se logra reducir la velocidad de incremento de espesor de la biopelícula. Además las burbujas chocan con el medio y reducen su tamaño, por lo cual atraviesan el medio con mayor facilidad y se incrementa así el contacto biopelícula-oxígeno y la transferencia del mismo.
  
5. Construcciones compactas presentan diseño simple con necesidades de espacio pequeñas. Por lo tanto, se ahorra considerablemente materiales, costos de ingeniería civil, así como requerimientos de área. <sup>(Waterworks SFEA,2002)</sup>
  
6. Capacidad de soportar cambios bruscos en la carga: esto se debe a que el oxígeno se encuentra libre y disponible para permitir varias poblaciones de bacterias, las cuales forman tres capas de bio-película: aerobia, facultativa y anaerobia, de afuera hacia dentro del espesor. Por lo tanto, un aumento de carga transitoria o la aparición de tóxicos ligeros de manera ocasional, puede manejarse sin problemas, pues existe una gran diversidad biológica para consumir dichos agentes contaminantes.
  
7. Ausencia de malos olores: En general no se esperan problemas de malos olores, a menos que no se suministre apropiadamente los requerimientos de aire al sistema.

8. Calidad excelente del efluente lo cual permite el uso del agua residual purificada para riego de áreas verdes suburbanas, parques etc, contribuyendo así a la reutilización de un recurso muchas veces escaso.<sup>2</sup>
  
9. Aumento de capacidad en plantas existentes: Este proceso es una alternativa viable para aquellas plantas que deben ser ampliadas que no disponen un área adicional para tal fin, no disponen de capital para una unidad de tratamiento adicional o sencillamente para las plantas de tratamiento que tienen dificultades para establecer una biomasa suficientemente concentrada en el tanque de aireación y lograr una operación altamente eficiente que se traduce en un efluente altamente clarificado. Generalmente los sistemas híbridos permiten aumentar la capacidad volumétrica del sistema en un 60%, debido a que presentan un área superficial de contacto mayor. (Bio-Clear Ireland Ltd,2002)

### **3.4. COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA HÍBRIDO Y EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS**

El sistema híbrido incluye dos tipos diferentes de biomasa que operan simultáneamente, la adherida y la suspendida. La biomasa de la biopelícula se caracteriza principalmente por ser independiente del ciclo del lodo presente en el sistema y del tiempo de retención hidráulico. Esto quiere decir que, sin importar estas condiciones, la biomasa de la película sigue su ciclo de crecimiento-desprendimiento de acuerdo a las características del medio, la turbulencia, la composición del agua residual etc. La edad de la biomasa en la biopelícula es mayor que la de los procesos de lodo activados comunes. En estos sistemas la fracción suspendida aumenta simultáneamente con la fracción fija en la bio película; aumentando así la biomasa total del sistema. Como la purificación es una función de la cantidad disponible de biomasa, la materia orgánica presente ahora desaparece de manera más eficiente.

Al incorporar el soporte a un sistema de lodos activados, se presenta inmediatamente la adhesión al medio de una parte considerable del lodo suspendido.

---

<sup>2</sup> La legislación venezolana a través de sus entes regulares (Ministerio de Salud y Asistencia Social) establece que se necesita emplear un filtro y un sistema de post-cloración, para reutilizar las aguas servidas para riego.

Este lodo suspendido que resulta se diferencia considerablemente del lodo que se produce generalmente en los procesos de lodos activados. Su fracción orgánica es más baja. Esto se debe a la interacción entre el lodo suspendido y el medio soporte. Esta interacción permite un aumento de los valores normales de SSML de aproximadamente de 1,0 g/l hasta alrededor de 3,5 g/l en el reactor. El lodo suspendido tiene una densidad más alta y presenta características perceptiblemente mejores de estabilización. Esto conduce a una eficacia más alta de separación del lodo.

Otra ventaja comparativa es la baja sensibilidad del sistema a las cargas bruscas puntuales, dado que la biomasa fija en la película, como ya se mencionó anteriormente, es independiente del régimen hidráulico.

Es importante considerar las ventajas y desventajas de estos dos tipos de crecimiento a la hora de combinarlos en un sistema de tratamiento. En la tabla 8 se pueden observar las mismas.

En la tabla 8 se puede observar las ventajas y desventajas de operar con sistemas de tratamiento biológico de crecimiento adheridos y de crecimiento sumergido para el tratamiento de aguas residuales, información extraída de la bibliografía. El sistema híbrido pretende combinar las ventajas de ambos sistemas expuestas en la tabla 6 y disminuir el efecto de las desventajas, simultáneamente. Por último es importante recordar que el objetivo principal de este trabajo es el determinar si realmente es apropiado utilizar esta nueva tecnología para el tratamiento de aguas residuales a nivel rural y urbano, en climas tropicales y de esta forma aportar una posible solución a esta situación.

**Tabla .- 8** Cuadro comparativo entre los dos tipos de sistemas

<b>SISTEMAS DE CRECIMIENTO ADHERIDO</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Simplicidad de operación y mantenimiento	Las unidades de polietileno corrugadas son elevado costo y de difícil fabricación. Son importadas por lo general
Baja producción de lodo	-----
Menor tamaño es los sedimentadores comparada con los sistemas suspendidos	Pueden existir problemas de olor sobre todo en climas cálidos.
Alta producción de biomasa	Presencia de larvas o moscas que pueden afectar el proceso de clarificación
Unidades modulares que permiten aumentar la capacidad	Consumo elevado de energía.
No es afectado por sobrecargas ni hidráulicas ni orgánicas	Presenta en algunos casos obstrucciones del medio de soporte
<b>SISTEMA DE CRECIMIENTO SUSPENDIDO</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Alta calidad del efluente debido al control de flujo de aguas residuales, presencia de oxígeno y la densidad bacteriana.	Altos costos de construcción: requiere un sistema de aireación potente. Altos costos de mantenimiento.
Mayor eficiencia que los sistemas anteriores porque el proceso es más independiente de la temperatura	Necesita personal capacitado para su operación.
Menor área que otros sistemas	Sistema sensible a sobrecargas y cambios bruscos en la características del efluente.
No produce olores desagradables ni moscas	Requiere un control completo de laboratorio
-----	Alta producción de lodos
Puede adaptarse a espacios reducidos mediante aereadores potentes	Requiere recirculación de lodos

Fuente: Metcalf. and Eddy, 1991

CAPÍTULO 4  
FUNDAMENTOS  
METODOLÓGICOS  
DE LA  
INVESTIGACIÓN



## **4.- METODOLOGÍA**

La evaluación de un nuevo sistema requiere seguir un conjunto de fases para realizar un análisis efectivo que permita obtener resultados confiables que constituyan un aporte científico en el área de nuevas tecnologías en tratamiento de aguas residuales aplicables a climas tropicales. En este caso la evaluación comparativa del sistema de lodos activados con el sistema híbrido se realiza en dos fases: la primera es la ingeniería conceptual, que comprende la recopilación de todos aquellos fundamentos teóricos necesarios para diseñar ambos sistemas. Además incluye la construcción de los mismos incluyendo sus respectivos sedimentadores secundarios así como el sistema de alimentación. La segunda a su vez se divide en dos subetapas, que son el acondicionamiento y puesta en marcha de los sistemas y la evaluación en sí de las unidades, comparándolas en igualdad de condiciones.

A continuación se describen detalladamente las etapas mencionadas necesarias para llevar a cabo este trabajo:

### **4.1.- Primera Fase: Desarrollo Conceptual e Ingeniería Constructiva:**

Constituye la fase de diseño y dimensionamiento de los equipos a ser evaluados. Esta primera fase abarca la revisión bibliográfica, el diseño de los equipos, la selección de las etapas a evaluar, que implica determinar las cargas a manejar en los sistemas, la selección de los materiales apropiados para la construcción y por último, la construcción de los sistemas de tratamiento.

#### **4.1.1 Revisión bibliográfica:**

Esta fase implica la recopilación de toda la información necesaria para realizar el diseño de los dos sistemas. Para ello se realiza la revisión de publicaciones periódicas y libros especializados en el área. Entre las publicaciones periódicas utilizadas se encuentran: The Water Science and Technology, Water Research, WPCF, etc. Es importante señalar que respecto a los fundamentos de diseño de los sistemas híbridos la información que se utiliza en este proyecto, en su mayoría, proviene de páginas web y publicaciones periódicas, pues los libros especializados en el área no presentan la información necesaria para poder realizar la ingeniería conceptual del proyecto.

#### **4.1.2 Definición de los parámetros de diseño de los sistemas:**

En esta etapa se utiliza la información obtenida en las publicaciones mencionadas y los conceptos teóricos de diseño para realizar el dimensionamiento apropiado de los sistemas a ser

evaluados. En esta fase la parte que presenta mayor dificultad es la de acoplar los conceptos de diseño de cada equipo por separado a los dos sistemas a evaluar, para lograr la máxima similitud entre ambos, pues la única diferencia que se desea es el medio de soporte, para comparar el funcionamiento del sistema híbrido y la posible mejora de la eficiencia de un lodo activado al ampliar su capacidad mediante el uso del material de soporte de la biomasa Bionet.

Los dispositivos a señalar son los sistemas:

- Tanque de aeración.
- Sistema de recirculación.
- Sistema de aeración.
- Sedimentador secundario.
- Sistemas de alimentación.

#### **4.1.3 Selección de las etapas a evaluar**

Para poder evaluar la capacidad de respuesta de ambos sistemas, es necesario evaluarlos en diferentes regímenes hidráulicos o modalidades, para así establecer una comparación a diferentes niveles de carga. En este caso se utilizan las modalidades de operación del lodo activado, específicamente la Aeración Extendida, la Convencional y la Alta Rata. Los parámetros importantes empleados para definir las etapas de operación a utilizar en este proyecto se presentan en la tabla 9:

**Tabla N° 9. Características de las modalidades del lodo activado consideradas**

Parámetros	Aeración Extendida		Convencional		Alta Rata	
	LODO	HÍBRIDO	LODO	HÍBRIDO	LODO	HÍBRIDO
Tiempos de retención hidráulico $\theta_h$ (h)	15		10		5	
Tiempos de retención celular $\theta_c$ (días)	25		15		10	
Relación de reciclo (%)	40	60	30	65	62	68
	0,360		0,540		1	

Es interesante señalar que las relaciones de reciclo no son iguales, para intentar lograr aumentar la cantidad de Sólidos suspendidos Volátiles en el Licor de Mezcla (SSVLM), pues en el sistema híbrido son despreciables. Sin embargo, a pesar de aumentar el reciclo de una etapa a otra,

los SSVLM son inferiores a 100 mg/l. Una concentración significativa de SSVLM en los sistemas híbridos se necesitan concentraciones superiores a 500 mg/l. <sup>(Rogalla, 1989)</sup>

#### **4.1.4 Selección de los materiales y construcción de los equipos:**

El tanque reactor seleccionado es de asbesto cemento. Dicho tanque tiene 1,2 m de largo; 0,75 m de alto y 0,56 m de ancho. En relación al material de construcción de los sedimentadores se considera un material que resista la fuerza ejercida por el agua y que sea capaz de soportar el efecto de expansión lateral de las paredes que ocurre por la presión que ejerce el agua y, al mismo tiempo, sea económicamente viable. Además el material debe ser inerte. La selección final la determina el criterio económico. Esta selección fue plexiglás de 10 mm y se utiliza como pegamento resina epóxica. Para el sistema de tuberías los materiales son acero galvanizado y mangueras de plástico.

La etapa de construcción duró aproximadamente cuatro meses e implica la construcción de un tabique divisor en los tanques de asbesto cemento, luego se comprueba que en el mismo no existan fugas, las cuales se sellan con fibra de vidrio. Adicionalmente se cortan las láminas que conforman los sedimentadores y se arman los mismos, verificando también la ausencia de fugas. Posteriormente se construyen los dispositivos de alimentación y reciclaje para ambos sistemas.

#### **4.2.- Segunda Fase: Evaluación preliminar:**

Esta segunda fase tiene dos etapas: una evaluación hidráulica en la cual se determina, mediante una prueba de trazadores a ambos sistemas simultáneamente, las características de comportamiento del flujo, posteriormente se presenta la evaluación del sistema de aireación.

A continuación se describen en detalle estas dos etapas:

##### **4.2.1- Evaluación hidráulica: Prueba de trazadores:**

La prueba de trazadores se realiza con la finalidad de determinar las características hidráulicas de los sistemas, para conocer aspectos como volumen efectivo, volumen muerto, cortocircuitos; así como el tipo de régimen predominante, es decir, si se pueden aplicar los modelos ideales de flujo pistón, flujo mezclado o flujo real disperso o combinaciones entre ambos.

Para ello se llenan los sistemas con agua proveniente de la red de abastecimiento de agua potable de la Planta de Tratamiento donde se realiza el proyecto y posteriormente se introducen en el

sistema de alimentación en forma de impulso (en un tiempo infinitamente corto) dos inyectoras de 20 ml de capacidad con una solución de cloruro de sodio de 35 g/l en cada sistema, lo cual implica la presencia de 14 g de sal por litro en el tanque. Luego, mediante dos conductímetros colocados uno en cada tanque, se registra el cambio de la conductividad a la salida de cada sistema durante un período de 9 horas y media. Posteriormente, utilizando las correspondientes curvas de calibración de estos instrumentos se determinan las concentraciones de cloruro de sodio a la salida. Luego empleando los modelos de flujo disperso, Wolf Resnick simplificado, el método convencional y el modelo de reactores ideales en serie, se analizan los resultados y se concluye respecto al tipo de flujo presente en cada sistema y sus características.

#### **4. 2.2- Evaluación del sistema de aireación:**

Esta fase se realiza mediante pruebas en los sistemas mediante diferentes condiciones de presión de aire. Esto se debe a que no existen características normalizadas del mismo, pues se construye específicamente para estos sistemas. La misma consiste en determinar las variables que influyen en el suministro de aire. Para ello se determina el comportamiento de la presión de salida del compresor para condiciones diferentes: sin la presencia de los difusores, con los difusores y con los difusores y la columna de agua. También se determina, mediante análisis matemático los flujos medios, máximos y mínimos a esperarse, según las condiciones de operación.

#### **4. 3.- Evaluación comparativa por etapa de los sistemas:**

Esta fase contiene tres subetapas: el arranque, en la cual se opera los sistemas por carga para lograr la formación y estabilización de la biomasa. Luego, se operan los sistemas en continuo para lograr la aclimatación de la biomasa y realizar la evaluación de las tres modalidades descritas en la sección anterior. Por último, se presenta la metodología de control y mantenimiento de los sistemas.

##### **4.3.1- Arranque: Formación de la biomasa:**

En esta etapa, se desea formar una biomasa activa apropiada para realizar un tratamiento eficiente. Para ello se debe colocar una cantidad de agua residual en los tanques para que a partir de ella se empiecen a formar los microorganismos en las condiciones deseadas en el proceso. Esta agua sirve como semilla o inóculo para activar el crecimiento. En el proceso de arranque se disponen de dos bombas sumergibles pequeñas (de 3,5 l/min cada una) para la alimentación de los sistemas y se evalúa la formación de la biomasa con la cantidad y características deseadas.

A continuación se explican los pasos a seguir:

- Para iniciar período de arranque del reactor, se llena el mismo por completo con el agua residual a tratar, luego se inicia el proceso de aeración constante durante un lapso de 48 horas.
- Al culminar este período se detiene la aireación y se deja sedimentar el líquido presente durante 1 hora, se vacía aproximadamente 3/4 partes del contenido del tanque y se procede nuevamente llenarlo. Se decide realizar este procedimiento mediante una manguera empleando el efecto sifón.
- Se inicia nuevamente el proceso de aireación, pero a partir de la segunda carga sólo durante 24 h. Este procedimiento se repite en ambos sistemas hasta alcanzar un cierto nivel en la formación de la biomasa, que corresponden a sólidos sedimentables Sólidos. Sedimentables  $\approx 350$  ml/l y Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)  $\approx 1550$  mg/l.
- Durante este período, se realizan las siguientes determinaciones en el licor de mezcla antes de iniciar cada carga: Oxígeno Disuelto, Temperatura, pH y Sólidos Sedimentables para determinar condiciones del sistema.

A medida que avanza el proceso de formación de la biomasa se hace necesario cargar el sistema dos veces al día, considerando los momentos de mayor carga en el afluente. (8:30 a.m. y 4:30 p.m.)

A continuación se presenta la frecuencia de determinación de las variables fisicoquímicas durante el proceso de arranque:

**Tabla 10.-** Frecuencia de determinación de variables fisicoquímicas

Parámetros	Frecuencia	
	Una carga	Dos cargas
pH	Una vez al día, al final de la carga	Dos veces al día, al final de cada carga
OD (Oxígeno Disuelto)	Una vez al día, al final de la carga	Dos veces al día, al final de cada carga
Temperatura	Una vez al día, al final de la carga	Dos veces al día, al final de cada carga
Sólidos Sedimentables	Una vez al día, al final de la carga	Dos veces al día, al final de cada carga

Durante las siguientes semanas de este período se realizan análisis de DBO<sub>5,20</sub> y Sólidos Suspendedos volátiles en el licor de mezcla (SSVLM) para determinar el instante en el cual se puede cambiar a la operación continuo:

**Tabla 11.-** Frecuencia de determinación de los análisis de control

Muestra	Parámetro	Frecuencia
Afluente	DBO <sub>5,20</sub>	2 semanales
Efluente	DBO <sub>5,20</sub>	2 semanales
Licor de Mezcla	SSVLM	Una vez a la semana

#### **4.2.3- Inicio de la operación continua:**

Se requiere que los sistemas operen bajo condiciones similares, donde las diferencias de operación se deban sólo al medio de soporte y no a las condiciones de operación.

La evaluación del sistema en operación continua comprende dos etapas: la estabilización o aclimatación del sistema a la etapa continua y la evaluación en continuo propiamente dicha.

En la etapa de estabilización, la biomasa formada por cargas se acostumbra al flujo en continuo. Esta etapa puede durar aproximadamente dos semanas, según las condiciones de cada

sistema. Se considera como factor de estabilidad la remoción constante de  $DBO_{5,20}$  y la concentración constante de los SSVLM (sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla).

Se analizarán las muestras como se observa en la tabla siguiente, tanto en la etapa de aclimatación como en el resto de las tres etapas continuas:

**Tabla 12.-** Frecuencia para evaluar los parámetros en los sistemas a evaluar

MUESTRA	PARAMETROS	FRECUENCIA
Afluente	DQO	3 semanales
	$DBO_{5,20}$	3 semanales
Efluente	DQO	3 semanales
	$DBO_{5,20}$	3 semanales
Licor Mezclado	pH	diarios
	Temperatura	diarios
	Oxígeno Disuelto	diarios
	Sólidos Sedimentables	diarios
	Sólidos Suspendidos Volátiles	3 semanales

Estos análisis se realizan en ellos laboratorios de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la U.C.V. Los métodos empleados se basan en aquellos reportados en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (APHA,2000)

A cada una de las muestras se le realizarán los análisis que se presentan en la tabla 13. En la misma tabla también se presenta el método que se va a utilizar en cada caso según el Standard Method.

**Tabla 13.-** Metodología analítica empleada para determinar los parámetros involucrados en los sistemas a evaluar

PARÁMETRO	MÉTODO	CODIGO SMWW*
Temperatura	Termómetro	2550
pH	Electrométrico	4500-H <sup>+</sup> B
Oxígeno Disuelto	Potenciómetro	4500-O G
Sólidos sedimentables	Volumétrico	2540 F
Sólidos Totales	Gravimétrico	2540 B
Sólidos Disueltos Totales	Gravimétrico	2540 C
Sólidos Suspendidos Totales	Diferencia	
Sólidos Totales Fijos	Gravimétrico	2540 E
Sólidos Disueltos Fijos	Gravimétrico	2540 E
Sólidos Suspendidos Fijos	Diferencia	
Sólidos Totales Volátiles	Diferencia	
Sólidos Disueltos Volátiles	Diferencia	
Sólidos Suspendidos Volátiles	Diferencia	
Demanda Química de Oxígeno	Reflujo abierto	5220-B
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Diluciones DBO <sub>5,20</sub>	5210 -B
Nitrógeno Orgánico	Macro Kjeldahl	4500-N <sub>org</sub> B
Nitrógeno Amoniacal	Titulométrico	4500-NH <sub>3</sub> C
Nitritos	Cromatografía Iónica	4500-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> C
Nitratos	Cromatografía Iónica	4500 -NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> C

\*Standard Method for the Examination of Water and Wastewater  
Fuente: APHA-AWWA-WEF, 2000

Este procedimiento se aplica cada vez que sea necesario evaluar la estabilidad del sistema.

#### **4.3.3- Evaluación de los sistemas (lodos activados y sistema híbrido):**

Los sistemas se evalúan para las condiciones de operación de la tabla 9. En el presente trabajo, cuando se determina que la etapa en estudio ha alcanzado las condiciones estables se realizan



tres muestreos compuestos 24 h, en los cuales se captan muestras cada hora de la entrada y la salida de los dos sistemas, se le determinan a las muestras instantáneas los parámetros OD, Temperatura, Conductividad, Alcalinidad, pH y se realiza una muestra compuesta de la entrada y una de la salida de cada sistema. A cada muestra compuesta se le realizan análisis de  $DBO_{5,20}$ , DQO, Nitrógeno total, Nitritos y Nitratos de acuerdo a la metodología señalada en la tabla 13. Adicionalmente se capta una muestra instantánea de la entrada y luego de transcurrido el tiempo de retención hidráulico correspondiente a la etapa se captan las respectivas salidas de los sistemas y se le realizan las mismas determinaciones que a la muestra compuesta. Además durante cada muestreo compuesto se realizan análisis de todas las formas de sólidos incluyendo los sólidos sedimentables en el licor de mezcla.

Al finalizar la evaluación de una etapa, se modifica el caudal correspondiente al siguiente tiempo de retención hidráulico, empezando por la modalidad de aereación extendida, luego la convencional y por último, la de alta rata.

#### **4.3.4- Metodología para el control de operación y mantenimiento de los sistemas:**

##### **4.3.4.1- Fijación, mantenimiento de caudal constante y medición del mismo:**

El caudal define el tiempo de retención hidráulico. Para lograr mantener el caudal constante y aproximadamente igual en ambos sistemas se manipula la válvula de globo para aumentar simultáneamente la entrada a ambos tanques y las válvulas de compuerta en cada tanque. Es importante señalar que una vez a la semana se suspende el flujo, se retira la bomba del pozo, se lava con agua de la red de abastecimiento. Luego se deja salir unos minutos el agua de la manguera para limpiarla antes de reiniciar la alimentación. También se retiran las válvulas, se limpian para evitar obstrucciones. El caudal se mide en varias oportunidades a lo largo del día, con un cilindro graduado en períodos de 15 s, luego se calcula el caudal por minuto. Durante el muestreo compuesto de cada etapa, se controla el caudal cada hora y se determina el promedio de esta manera. Es importante señalar que este método permite lograr el promedio deseado de caudal en cada etapa y durante los muestreos compuestos.

##### **4.3.4.2- Captación de muestras instantáneas y compuestas:**

Como la carga del afluente varía a lo largo del día debido a que proviene de un colector mixto de aguas municipales, las muestras de control instantáneas se captan entre las 9 y las 11 de la mañana. La muestra del afluente se capta directamente de la llave de purga, los efluentes en las

respectivas salidas de cada tanque. Para captar la muestra instantánea se espera el tiempo de retención hidráulico, tal como lo presenta Blanco (1997).

Para determinar los sólidos en el reactor se capta la muestra directamente del licor de mezcla, previamente se resuspenden los sólidos mediante el empleo de una escoba, pues los mismos tienden a sedimentar en el fondo del tanque y la muestra no es representativa.

#### **4.3.4.3- Control del sistema de aireación:**

Con respecto al suministro de aire se verifica que los difusores no estén tapados. En el caso del sistema híbrido se aumenta bruscamente el suministro del flujo de aire, mediante la válvula de control en la salida del compresor. Esto no sólo destapa los difusores, sino que lava la película, la cual es conveniente mantener con un espesor tal que le permita mantener en su interior un mayor porcentaje de composición aerobia. Esto se realiza al inicio de cada etapa. Es importante mencionar que durante la evaluación se realizan mediciones de OD y se aumenta el suministro hasta lograr entre 1 y 2 mg/l en el sistema de lodos activados y entre 3 y 4 mg/l en el sistema híbrido, valores que permiten mantener condiciones óptimas de operación.

#### **4.3.4.4- Operación y mantenimiento de los sedimentadores:**

En el caso de la recirculación, debido al diseño de la tolva solamente una pequeña cantidad de lodo se recicla. Para corregir este inconveniente se debe “barrer” durante los 15 min. de cada período de recirculación el lodo del fondo, para evitar así que el lodo permanezca demasiado tiempo en el sedimentador. En el caso del sistema híbrido tres veces por semana se abre la llave de purga para retirar la película que permanece en el fondo y se descompone en condiciones anaerobias. En caso de no realizarse este proceso, cada cierto tiempo el reciclo se vuelve putrefacto y deteriora las condiciones del sistema, bajando bruscamente el oxígeno disuelto. Adicionalmente se verifica varias veces diarias que el orificio de entrada y salida de los sedimentadores se encuentren destapados. La manguera de alimentación se limpia introduciendo agua potable de la red de abastecimiento a presión para retirar los sólidos que cada cierto tiempo la obstruyen.

#### **4.3.4.5- Control del tiempo de retención celular:**

Para mantener el tiempo celular de cada etapa se retira el caudal de purga ( $Q_w$ ) correspondiente del licor de mezcla. Se retira el caudal de purga correspondiente en tres partes, cada

3 ó 4 horas, para evitar introducir perturbaciones adicionales en el sistema de lodos activados. Esto se debe a que retirar todo el caudal de una vez, produce la suspensión del caudal de salida por períodos de tiempo que pueden llegar incluso a 20 minutos.

#### **4. 4- Cuarta etapa. Evaluación y comparación general de los resultados:**

Los resultados obtenidos mediante las pruebas de laboratorio realizadas, se analizan para obtener :

- La comparación de la eficiencia de ambos sistemas en relación con la eliminación de material carbonáceo, así como el funcionamiento y características de operación de los mismos.
- Las posibles ventajas y desventajas del uso del lodo activado y del híbrido para la remoción de material carbonáceo.
- Condiciones favorables de operación y de mantenimiento apropiadas que garanticen el adecuado desempeño de las unidades.

Como complemento adicional se realizan observaciones microbiológicas, pues como lo señala Mácia (1996) la microfauna presente en el licor de mezcla se relaciona con la calidad del efluente y con las condiciones del sistema. Por lo tanto un seguimiento periódico al microscopio (de manera cualitativa sin realizar ningún tipo de correlación al respecto) como lo realizan Rincones (1995), Fernández (1999) y Finamore (1999) puede permitir corregir algunos problemas operativos a tiempo. La comparación superficial de la microfauna presente, sólo tiene finalidad informativa pues no el objetivo de este trabajo.

También se toman fotografías del flóculo del lodo activado, así como de la biopelícula, para presentar las características generales de la biomasa presente en estos sistemas.

# CAPÍTULO 5

## RESULTADOS

## OBTENIDOS

# DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## 5.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en este trabajo, así como la respectiva discusión de los mismos. Se presentan diferentes secciones a fin de abarcar de manera más eficiente el amplio rango de variables que implica comparar dos sistemas que son diferentes en su funcionamiento.

Por ejemplo, en el sistema híbrido, es imposible determinar la biomasa total dentro del sistema, pues no es fácil determinar la cantidad de biopelícula presente. Esto implica que no son aplicables relaciones como F/M y que la carga orgánica aplicada que se considera es la superficial. Todo lo relacionado con la capacidad de tratamiento de los sistemas, asociado a la biomasa presente, se considera con especial cuidado. Por eso, se establece la comparación entre los sistemas en cada etapa evaluada, así como una comparación general al final.

La primera sección presenta los parámetros de diseño seleccionados, la descripción de los sistemas y la construcción de los mismos. En la sección siguiente se presenta la evaluación hidráulica y del sistema de aireación, aspecto importante, porque estos sistemas no están estandarizados según los valores de diseño establecidos, pues son unidades a escala piloto, para investigación y ajuste experimental. Esto es especialmente relevante en el sistema híbrido, donde no existe información que permita realizar el diseño de forma segura. Además los dispositivos utilizados para el sistema de aireación, son diseñados especialmente para este trabajo y no se conocen previamente sus características de funcionamiento. Posteriormente se presenta la evaluación fisicoquímica, la cual presenta la evaluación del sistema en cada etapa y por último la evaluación global del comportamiento de los sistemas, así como la descripción de las características de operación y mantenimiento.

## **5.1 DESARROLLO CONCEPTUAL E INGENIERÍA CONSTRUCTIVA DE LOS SISTEMAS:**

A continuación se describen los parámetros seleccionados para el diseño y construcción de los sistemas evaluados en este trabajo:

### **5.1.1 Parámetros de diseño:**

En esta sección se presentan las bases de diseño, para cada unidad del sistema de tratamiento. Para establecer el diseño y dimensiones de los sistemas a estudiar en este proyecto se analiza cuidadosamente la información suministrada a través de las publicaciones científicas y páginas web, para lograr que las características de los mismos proporcionen resultados satisfactorios en su operación y evaluación.

Los sistemas a estudiar en este proyecto son los lodos activados, en varias de sus modalidades y un sistema híbrido de tratamiento biológico. Este último basado en el principio de lodos activados, con la novedad de la adición de un soporte fijo que permite la formación de biomasa adherida adicional para el tratamiento. Ambos sistemas parten de un mismo diseño, ya que el único elemento que los diferencia es la matriz fija incorporada al sistema híbrido, la cual es de polietileno de color negro y esta formada por cilindros con vacíos para evitar obstrucciones, que se conoce como comercialmente BIONET. La disposición del mismo dentro del medio se realiza considerando las relaciones largo–ancho de manera tal que el espaciamiento superior, inferior y lateral permitan aprovechar al máximo el área superficial del mismo.

Por todo lo antes expuesto, es importante señalar que la relación volumétrica entre el medio de soporte y el volumen del tanque de aireación, fue el punto de partida para el diseño. Este criterio es el más importante y a partir de él se definen las dimensiones de ambos sistemas, para así lograr características idénticas en su dimensionamiento que permitan la comparación. El valor seleccionado fue de 27 %. Este valor debe encontrarse, según la bibliografía consultada, entre 18 y 28 % para tener resultados aceptables. Valores de relación superiores a este rango no representan mejoras significativas en la eficiencia del sistema. <sup>(Müller,1998)</sup>

En relación a los demás criterios utilizados para el diseño de ambos sistemas, se consideran los mismos utilizados para el diseño de lodos activados. Como en el presente proyecto se evalúan tres etapas que varían en comportamiento desde aireación extendida hasta la modalidad de alta rata, se consideran los parámetros de diseño de estas modalidades en los sistemas lodos activados, pues constituyen los valores máximos a esperarse durante la operación del sistema, para determinar los requerimientos teóricos de oxígeno necesarios para lograr una buena aireación, lo cual determina los flujos de aire para cada etapa, para obtener la concentración de oxígeno apropiada y la agitación deseada simultáneamente. En el diseño del sistema de aireación, además de considerar lo expuesto anteriormente, es indispensable calcular las pérdidas generadas por el tramo de tuberías, los accesorios presentes en el mismo y los dispositivos seleccionados como difusores, para determinar la capacidad del compresor a utilizar y suministrar efectivamente la aireación deseada.

El sistema correspondiente de alimentación debe suministrar agua continuamente, además debe permitir un flujo similar en ambos tanques en todo momento de la evaluación. Adicionalmente, debe permitir captar muestras del afluente en cualquier momento que se desee.

Para lograr un efluente clarificado se incorpora como tratamiento secundario un sedimentador. Para el diseño del mismo los criterios empleados son la sedimentación por gravedad y el logro de una remoción eficiente de los sólidos suspendidos, mediante una configuración que facilite la deposición de las partículas en el fondo de la tolva. También se considera la rata de desbordamiento superficial, según las necesidades del sistema de lodos activados. Además se considera la sección de área disponible en el tanque para ubicar el sedimentador. En la configuración se considera un ángulo de inclinación de 60°, paredes asimétricas y tolva rectangular. Se incorpora una cámara para amortiguar el flujo en el sistema de lodos activados para disminuir la velocidad de entrada del flujo y facilitar la sedimentación.



Se requiere construir la base de soporte del medio, para lograr que permanezca fijo, en todo momento durante la operación de los sistemas. La misma debe cumplir varios requisitos para que sea satisfactorio su desempeño. El material elegido tiene que ser sólido, anticorrosivo. El material usado para el marco es aluminio, que cumple estas características. El peso de la base, incluyendo el material de soporte, tiene que compensar la flotabilidad y la elevación causadas por la corriente a través del mismo.

Es importante lograr evitar la flotabilidad, a pesar de la agitación presente en tanque de aireación. Para ello se fija a los bordes del tanque, de manera que cualquier movimiento sea imposible. La suspensión es muy simple y permite el retiro de las jaulas sin herramienta. La base se instala sobre los aireadores, para obligar a las burbujas de aire que se escapan, pasen a través del medio que soporta la biopelícula y así evitar cortocircuitos. La distancia entre los aireadores y el fondo de la base de soporte se extiende entre 0,15 m y 0,65 m. <sup>(Müller, 1998)</sup> En este caso la separación es 0,15 m. La base de soporte la conforman 4 láminas cruzadas fijas al medio de soporte y a su vez a las paredes del tanque. Esta consideración es la más adecuada desde el punto de vista económico y cumple con todos los requerimientos mencionados

El criterio para el diseño del sistema para recircular el lodo, es la funcionalidad y eficiencia para el transporte del lodo de reciclaje sin obstrucciones frecuentes. Esto implica una capacidad elevada de manejar sólidos suspendidos. Por este motivo se selecciona el sistema air lift, por ser sencillo, eficiente y económico.

En las tablas 14 y 15 se presenta un resumen de los criterios y parámetros empleados para el sistema híbrido y el sistema de lodos activados, respectivamente.

Tabla No. 14 Fundamentos empleados en el diseño de los equipos para el sistema híbrido

Dispositivo a diseñar	Criterio empleado	Parámetro de diseño correspondiente
Tanques de aeración	Relación volumen del tanque-volumen del medio (27 %)	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Caudales entre 510- 1532 l/d</li> <li>⇒ Cargas superficiales: 8-12 Kg.DBO/m<sup>2</sup>*d</li> <li>⇒ Tiempo de retención hidráulico. (15, 10 y 5 h)</li> <li>⇒ Tiempo de retención celular (25, 15 y 10 días)</li> </ul>
Sistema de recirculación	Funcionalidad y transporte eficiente de los sólidos sin obstrucciones y costos económicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Relaciones de reciclo entre 25 y 100 % del caudal de operación.</li> <li>⇒ Rango aproximado : 130 – 1000 l/d</li> </ul>
Sistema de aireación	Requerimientos de O <sub>2</sub> y mezclado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Porcentaje de transferencia de oxígeno al agua a través de difusores (8%).</li> <li>⇒ Concentración de oxígeno en el tanque: 3 – 4 mg/l.</li> </ul>
Sistema de alimentación	Disponibilidad de flujo de agua residual lo más continuo y constante posible	⇒ Caudales de operación máximos del sistema 1532 l/d.
Base de soporte	Fijar el medio, sin permitir que flote. Que permita el libre paso del flujo y que el material del mismo sea anticorrosivo.	⇒ Dimensiones del medio: 0,6 m * 0,45 m * 0,3 m
Sedimentadores	Configuración que permita la remoción eficiente de sólidos suspendidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Angulo de 60°</li> <li>⇒ Rata de desbordamiento Superficial ≥ 16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>*d</li> <li>⇒ Velocidad horizontal ≥ 30 cms/min</li> </ul>

Tabla No. 15 Fundamentos empleados en el diseño de los equipos para el sistema de lodos activados

Dispositivo a diseñar	Criterio empleado	Parámetro de diseño correspondiente
Tanques de aeración	Dimensiones obtenidas empleando la relación volumétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Caudales entre 510- 1532 l/d</li> <li>⇒ Cargas orgánicas entre 0,15 y 0,25 Kg. DBO/Kg. SSVLM*d.</li> <li>⇒ Tiempo de retención hidráulico. (15, 10 y 5 h)</li> <li>⇒ Tiempo de retención celular (25, 15 y 10 días).</li> </ul>
Sistema de recirculación	Funcionalidad y transporte eficiente de los sólidos sin obstrucciones y costos económicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Relaciones de reciclo entre 25 y 100 % del caudal de operación</li> <li>⇒ Rango aproximado : 500 – 1500 l/d</li> </ul>
Sistema de aireación	Requerimientos de O <sub>2</sub> y mezclado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Porcentaje de transferencia de oxígeno al agua a través de difusores (8%).</li> <li>⇒ Caudal máximo de operación: 1532 l/d</li> <li>⇒ Concentración de Oxígeno en el tanque 1-2 mg/l</li> </ul>
Sistema de alimentación	Disponibilidad de flujo de agua residual lo más continuo y constante posible	⇒ Caudales de operación máximos del sistema 1532 l/d
Sedimentadores	Configuración que permita la remoción eficiente de sólidos suspendidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Angulo de 60°</li> <li>⇒ Rata de desbordamiento Superficial ≥ 16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>*d</li> <li>⇒ Velocidad horizontal ≥ 30 cms/min</li> </ul>

Como resultado de aplicar los criterios presentados en las tablas 14 y 15, se presenta en la tabla 16 las dimensiones de los tanques empleados y los dos sedimentadores.

**Tabla N°.16-** Dimensiones del tanque de aireación y del sedimentador en los dos sistemas a evaluar en el presente trabajo

<b>Dimensiones (m)</b>	<b>Tanque de Aireación</b>	<b>Sedimentador</b>
Ancho	0,56	0,24
Largo	0,95	0,45
Profundidad	0,60	0,50

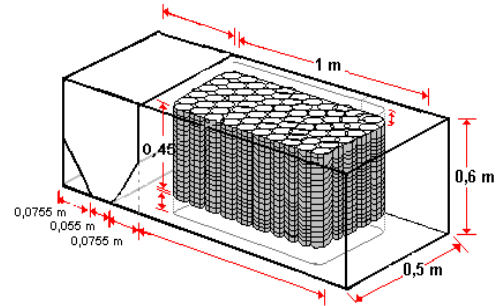
### 5.1.2 Descripción general de los equipos

El esquema general de tratamiento a estudiar, consta de un tanque de aireación y un tanque de sedimentación para ambos sistemas. A continuación se presenta la descripción de cada sistema de forma individual.

- **Sistema híbrido:**

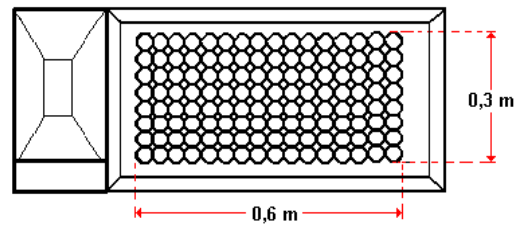
El tanque de aireación está constituido por un recipiente rectangular de asbesto cemento. En la figura 7 se puede observar el medio de soporte rectangular que mide 60 x 45 x 30 cm de largo, alto y ancho respectivamente. Ocupa de un volumen de 81 litros. El tanque tiene un volumen de 319,2 litros y tiene 95 x 60 x 56 cm de largo, alto y ancho respectivamente. El medio se encuentra a 10 cm de separación con el fondo del tanque, y 5 cm con respecto al borde superior. La distancia con respecto a la pared de salida del líquido es 30 cm y la separación con respecto a la pared de entrada es 20 cm. Las separaciones entre las paredes laterales son de 7,5 cm. Estas separaciones con la finalidad de permitir el paso del líquido.

Como se aprecia en la figura 5 que presenta una vista lateral, seguidamente se encuentra el sedimentador, el cual está ubicado dentro del mismo tanque, separado por un tabique también de asbesto cemento.



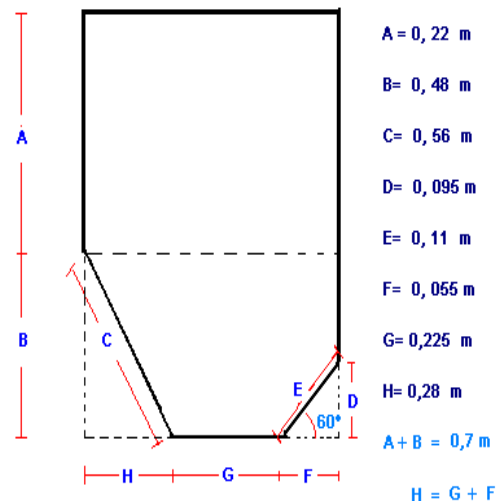
**Figura 5:** Esquema de la vista lateral del sistemas híbrido

La figura 6 presenta la respectiva vista de planta, donde se puede observar la distribución del medio y el sedimentador dentro del tanque empleado como sistema híbrido.



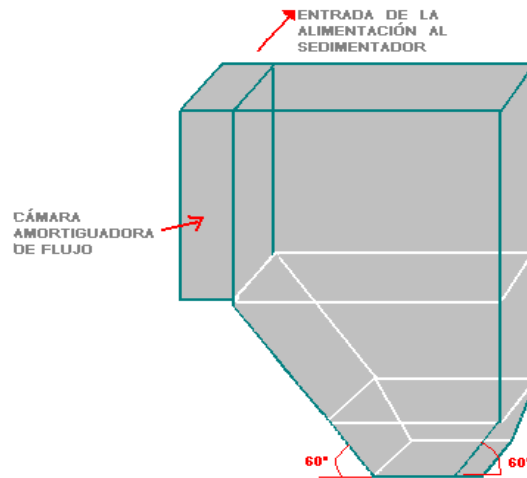
**Figura 6:** Vista de planta del sistema híbrido

El tanque está conectado al sedimentador por un orificio ubicado en el tabique a una altura de aproximadamente 0.6 m y de 1/2" de diámetro externo. El efluente pasa a una cámara para amortiguar el flujo en el caso del lodo. En el caso del híbrido la cámara se retira, pues se obstruye con facilidad debido a la película. El sobrenadante obtenido del sedimentador, se retira del tanque a través de un orificio al final del recorrido del agua dentro del sedimentador, en cual existe una pequeña manguera, de 1/2" de diámetro externo. Este sedimentador presenta una sección cónica asimétrica, con pendientes distintas y ángulos laterales de 60° en la tolva. Esto se puede observar en un esquema en la figura. 7, en la cual se presenta un corte longitudinal de la sección transversal de ambos sedimentadores que son iguales, con sus respectivas dimensiones.



**FIGURA 7:** Corte transversal que muestra las dimensiones del sedimentador

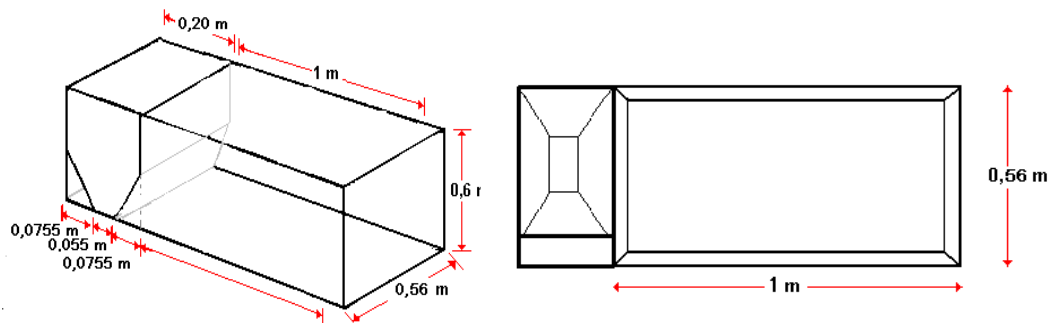
En la figura 8 se presenta el esquema del sedimentador del sistema híbrido donde se aprecia que el flujo entra directamente sin ningún dispositivo, pues está se obstruía con facilidad, debido a la película.



**FIGURA 8:** Vista lateral donde se puede apreciar la estructura del sedimentador del híbrido

- **Sistema de lodos activados:**

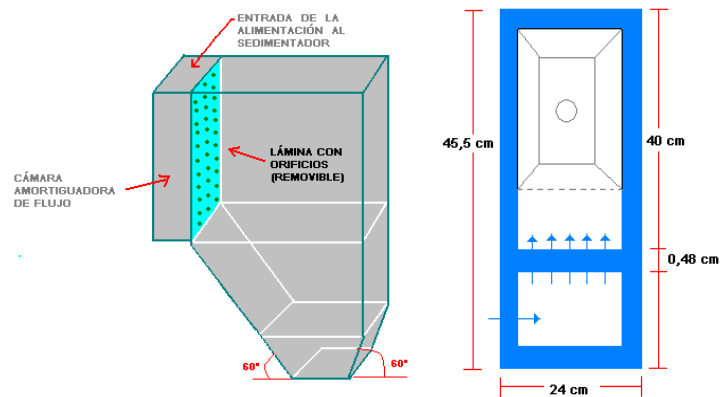
El sistema de lodos activados es similar al sistema híbrido, sólo que no presenta medio de soporte. El esquema se aprecia en la figura 9.



**Figura 9:** Esquema de la vista lateral del lodo activado (izquierda) Vista de planta (derecha) del sistema de los activados

A continuación se presenta el esquema del sedimentador del lodo, similar al empleado en el sistema híbrido, sólo que presenta la cámara amortiguadora y una pared de orificios. La cámara amortiguadora de flujo (en el sedimentador del lodos activados) que se encuentra a la entrada del mismo, consta de una sección rectangular y una lámina perforada, que permite distribuir el flujo de entrada y lograr que el mismo se introduzca lentamente en el sedimentador y evitar así que resuspendan las partículas sedimentadas. Posteriormente se colocan tres pantallas a la entrada, en la

sección intermedia y la final, para evitar las pérdidas de los sólidos del sistema. En la figura 9 se muestra un corte transversal del sedimentador del lodo.



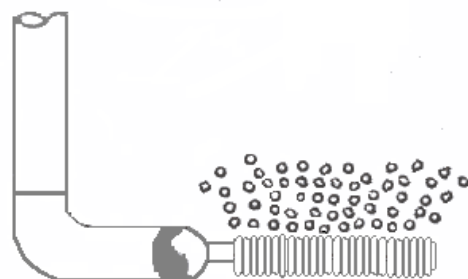
**FIGURA 9:** Vista lateral donde se puede apreciar la estructura del sedimentador del lodo

- **Características comunes en ambos sistemas:**

A continuación se presentan las características comunes en ambos sistemas, relacionadas con el sistema de aireación y alimentación.

El sistema de aireación está conformado por los difusores y el compresor. Los difusores están elaborados con filtros de cerámica de 25 micras y una tubería de ½” de PVC. El sistema de tuberías que conecta el compresor con los sistemas de difusores es de ¾” de PVC. El esquema incluye tres difusores equiespaciados en el fondo del lodo activado y en forma de triángulo en el híbrido, para facilitar la aireación, pues el medio obstruía el proceso si se colocaban equiespaciados. Por lo tanto, se ajusta su disposición para lograr mezcla uniforme y la cantidad de oxígeno disuelto adecuado. En la salida de cada compresor se encuentra una válvula que permite variar apropiadamente el flujo de aire que entra al sistema.

En la figura 11 se observa el esquema del difusor de burbuja utilizado para lograr la mezcla y transferencia de oxígeno necesario en todo proceso aerobio. Este difusor,



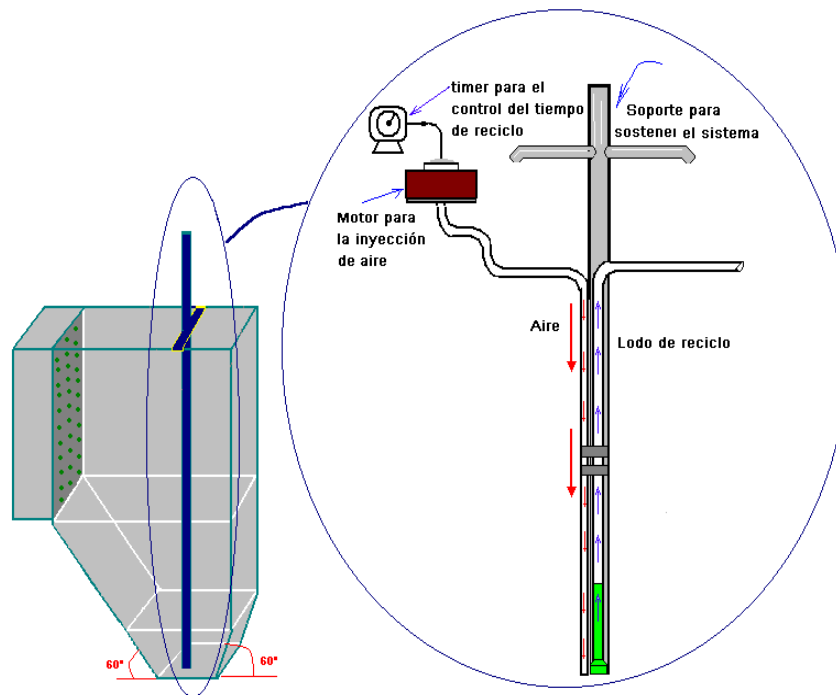
**Figura 11:** Difusor de aire de burbuja gruesa utilizado en los sistemas

consiste en una tubería de ½ “ con perforaciones en línea vertical y horizontal, el cual se introduce en un filtro poroso, encargado de promover el ascenso de las burbujas.

El sistema de alimentación consta de una bomba sumergible pequeña y una manguera de ½”, conectada a los dos tanques en la parte inferior para evitar en la medida de lo posible cortocircuitos. Dicha bomba está ubicada en el pozo principal el cual a su vez se alimenta del colector izquierdo del Río Valle. La información relacionada con este dispositivo se amplía en la sección de construcción.

Por último, y no menos importante, el esquema de tratamiento consta de un sistema de recirculación conocido como air lift, el cual por efecto de vacío (logrado mediante el suministro de aire que proviene de un pequeño motor como los empleados en las peceras) succiona el lodo sedimentado en la tolva para ser llevado a través de una tubería de ¾” de diámetro interno de PVC a la alimentación del tanque, para de esta forma ingresarlo al sistema nuevamente. Las mangueritas que suministran el aire del motor al interior del sistema es de 3/8” de diámetro eterno. Las mangueritas que trasladan el flujo de reciclaje al tanque de aireación son de ¼” de diámetro externo.

En la figura 12 (Página 65) se presenta un esquema de la disposición dentro del sedimentador del sistema de reciclaje y una ampliación de las características del sistema air lift. El mismo consta de dos modalidades: en el sistema de lodos activados el dispositivo está conectado a un timer el cual regula que el reciclaje se realice cada cierto tiempo el cual se fija de acuerdo a la cantidad de sólidos presentes y la relación de reciclaje que se desea en cada etapa. En la primera etapa es 15 min. cada tres horas y en la segunda 15 min. cada dos horas. En la tercera 15 minutos cada hora. En el caso del sistema híbrido el reciclaje se emplea, pero no está conectado al timer, sino que se mantiene continuo, debido a que la película sedimenta muy rápido y si se espera demasiado tiempo, se descompone en el fondo del sedimentador, generando un reciclaje anaerobio de muy mal olor.



**FIGURA 12:** Esquema del sedimentador con una ampliación del sistema air lift de reciclo.

El sistema contiene además un protector de voltaje marca EXCELINE GSM-R 117 para 110 V que se presenta junto con el timer, en el diagrama de la figura 12 y junto con el regulador del sistema de reciclo del lodo en la fotografía de la figura 13. El protector es utilizado para proteger los compresores del sistema de aireación de los picos en el suministro de electricidad.

Es importante mencionar que los sistemas se localizan al lado de las lagunas de estabilización y la torre de distribución central, bajo un techo de vinil verde, para evitar la excesiva incidencia de los rayos solares y de la lluvia sobre los sistemas. Todo ello ubicado en la Planta



**FIGURA 13:** Protector de seguridad de los compresores (derecha) y timer (izquierda).

Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela.



### 5.1.3 Construcción de los sistemas:

En esta sección se presentan una serie de fotografías en la cual se pueden apreciar todas las unidades que conforman los dos sistemas de tratamiento empleados; la figura 14 corresponde a una vista lateral de los tanques. Se observa la presencia de las tuberías de aereación, los soporte de madera del medio y los tabiques divisores. Los tanques no están conectados entre sí, funcionan en paralelo, no en serie. Estos comparten la misma alimentación, con similar carga orgánica y condiciones de flujo, pero diferentes salidas.



**Figura 14:** Vista lateral de los dos tanques. Atrás Sistema Híbrido. Primer plano: Sistema de lodos Activados.

En la figura 15 se aprecia el momento de instalar el medio dentro del tanque. En el mismo se observa el dispositivo empleado para fijarlo. Este consiste en dos tabiques de madera que están unidos a la base de soporte mediante un alambre prensado. También se puede observar las separaciones laterales del medio con el tanque.



**Figura 15:** Ubicación del medio dentro del tanque

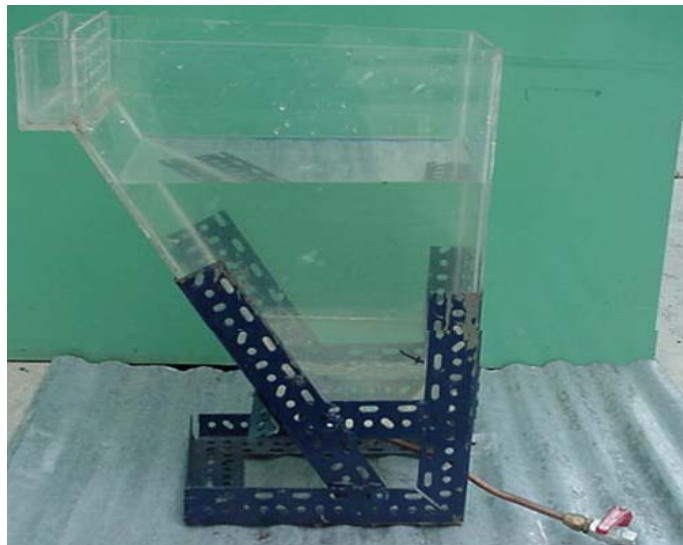
En la figura 16 se presenta la ubicación de los sedimentadores dentro de uno de los tanques, es la misma para los dos. Se aprecia la cavidad construida para su ubicación. En ella se puede observar la disposición del tabique divisor y de los dispositivos de entrada del flujo al sedimentador, el dispositivo de salida del efluente y la cámara amortiguadora con la pared de orificios. En el plano posterior se pueden observar los difusores dentro del tanque.



**Figura 16:** Disposición del sedimentador dentro del tanque. En el plano del fondo se observan los difusores.

En la figura 17 se presenta el sedimentador utilizado.

Se puede apreciar, la cámara amortiguadora, en este caso con la pared de orificios. También se puede observar la base para colocar el sedimentador dentro de la cavidad dentro del tanque, dispuesta para tal fin. La finalidad de la base es mantenerlo fijo, sin movimiento. Esto es necesario para evitar problemas en la operación por oscilaciones del sedimentador.



**FIGURA 17:** Fotografía lateral donde se puede apreciar la estructura real del sedimentador.

La válvula que se observa en el fondo del sedimentador se emplea para remover los sólidos depositados en el fondo, en el caso de ser necesario. En el sedimentador del híbrido se utiliza con frecuencia para remover la película, pues se descompone en el fondo del mismo y genera malos olores.

Adicionalmente a lo antes dicho, el sistema de tratamiento consta de un sistema de aireación, el cual suministra el oxígeno necesario al tanque. El sistema de aireación esta constituido por dos compresores de  $\frac{1}{2}$  hp cada uno, los cuales podemos apreciar en la figura 18, que alimentan cada uno a un tanque con un sistema de tres difusores. Las tuberías son de polietileno rojo de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro interno. Inicialmente existía un sólo compresor, pero a partir de la segunda etapa se necesitan dos compresores. A continuación se presentan ambos compresores.



FIGURA 18: Compresores empleados en la evaluación: el amarillo corresponde al lodo activado y el gris al sistema híbrido.

En la figura 19 se presenta los difusores en el sistema de lodos activados. En la misma se aprecian los filtros, colocados sobre tres tuberías perforadas con orificios radiales. El filtro permite disminuir el tamaño de las burbujas, logrando así una salida uniforme de las mismas.

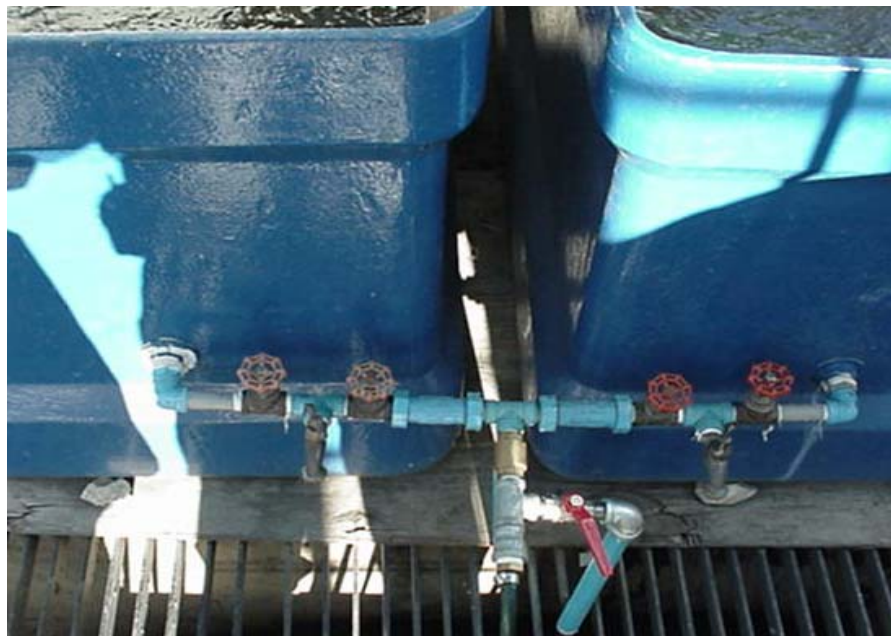
Es importante mencionar que es muy importante evitar obstrucciones de los mismos, mediante mantenimiento periódico. El sistema de alimentación consta de una bomba sumergible pequeña y una manguera de  $\frac{1}{2}$ ", conectada a los dos tanques en la parte inferior para evitar en la



FIGURA 19: Fotografía de los sistemas de difusión de aire correspondiente al sistema de lodo activados.



medida de lo posible cortocircuitos. Dicha bomba está ubicada en el pozo principal el cual a su vez se alimenta del Colector Marginal Izquierdo Río Valle. La disposición se presenta en la figura 20. En la misma se puede apreciar la válvula de paso rápido que regula la cantidad de purga y dos válvulas de globo en cada tanque, para regular el caudal que entra a cada uno. La sección dorada es la válvula encargada de, en caso de suspensión del flujo de entrada, evitar que los tanques se vacíen, evitando que el flujo se regrese. La válvula de purga se requiere porque el caudal de la bomba utilizada es 3,5 l/min, para mantener valores inferiores a éste en las dos primeras etapas se desecha el agua en exceso, mediante este mecanismo.



**FIGURA 20:** Fotografía del sistema de alimentación a los dos tanques.

## **5.2 EVALUACIÓN PRELIMINAR:**

A continuación, los resultados de la evaluación preliminar.

### **5.2.1 Evaluación hidráulica: Prueba de trazadores:**

A continuación se presentan los resultados de la prueba de trazadores, los cuales muestran la recuperación casi total del trazador. Esto permite afirmar que esta información es bastante confiable. Los valores complementarios se presentan en los

anexos. En la tabla 17 se muestra la cantidad de trazador obtenido en la salida para ambos sistemas.

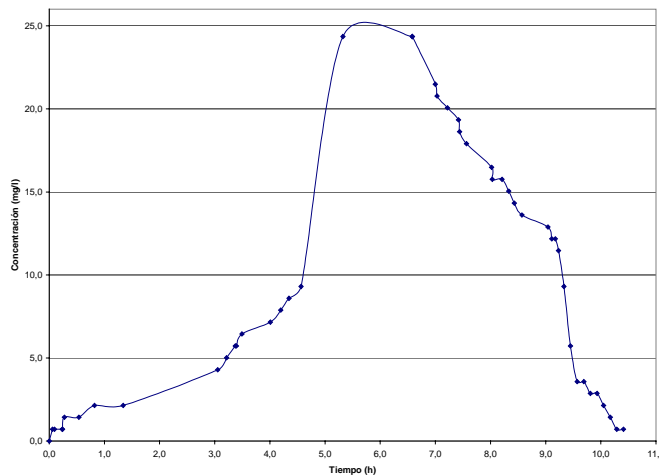
**Tabla N°.17-** Resultados de la recuperación de los trazadores en los sistemas

<b>Masa de trazador inyectada a cada sistema (mg NaCl)</b>		7100
<b>SISTEMA</b>	<b>Masa recuperada</b>	<b>Porcentaje de Recuperación del Trazador (%)</b>
<b>LODO</b>	6330	89
<b>HIBRIDO</b>	5127	72

Los porcentajes de recuperación en ambos sistemas son elevados, mayores de 70 %, lo cual quiere decir que los resultados son representativos del comportamiento hidráulico, es decir son confiables. (Carrión, 1992)

- **Sistema híbrido:**

En la figura 21 se presenta la curva de concentración en función del tiempo para el sistema híbrido. En la misma se puede observar que, en el caso del sistema híbrido, una curva característica para un flujo real disperso.



**FIGURA 21:** Comportamiento de la concentración del trazador a la salida del sistema híbrido

En la tabla 18 se presentan los resultados de los valores de los tiempos de retención teórico y experimental.

**Tabla N°.18-** Resultados de los tiempos de retención para el sistema híbrido.

<b>HÍBRIDO</b>	
<b>Promedio-Caudal (l/min)</b>	0,82
<b>Tiempo de retención Teórico (h)</b>	6,50
<b>Tiempo de retención Experimental (h)</b>	6,32
<b>% Desv.</b>	2,8 %

En la tabla 18 se observa que la diferencia entre el tiempo de retención teórico y el experimental en el caso del sistema híbrido se considera despreciable. Esto quiere decir que la mayor parte de las partículas que entran al sistema salen del mismo aproximadamente en el momento en que se espera que salgan. En la tabla 19 se presenta la información de los parámetros estadísticos, los cuales dan información de la distribución de las partículas dentro del sistema.

**Tabla N°.19-** Evaluación de los parámetros estadísticos para el sistema híbrido

<b>Media (<math>\mu</math>)</b>	6,32
<b>Varianza (<math>\sigma^2</math>)</b>	6,61
<b>Relación <math>\sigma^2/\mu^2</math></b>	0,16
<b># de tanques ideales en serie (N)</b>	6,00
<b>Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</b>	1,78
<b>Factor acéntrico (<math>\gamma</math>)</b>	1,38

Los resultados indican que existe bastante simetría, sobretodo si se compara con el sistema de lodos activados, que se presenta posteriormente. La tendencia de las partículas que entran al sistema, según el valor de la desviación estándar que se obtiene, es de una distribución normal. De acuerdo al valor de N se puede aproximar a seis tanques en serie, lo cual implica mayor tendencia al flujo pistón que a mezcla completa.

Por otro lado, aplicando el método de Wolf Resnick simplificado se obtiene el grado de similitud con el modelo ideal de mezcla completa o de flujo pistón. Además podemos tener una idea del porcentaje de volumen muerto, para conocer así el volumen efectivo del sistema. En la tabla 20 se aprecian los resultados de ajustar los resultados a este método.

**Tabla N°.20-** Valores obtenidos según el método de Wolf Resnick simplificado para el sistema híbrido

<b>Porcentaje de RFP</b>	71 %
<b>Porcentaje de RMC</b>	28 %
<b>Volumen muerto</b>	5 %
<b>Volumen efectivo</b>	94 %

Estos resultados confirman el predominio del flujo pistón en el sistema híbrido en un 71 %, lo cual implica que existe poca mezcla en el sistema, apenas un 28 %. Adicionalmente se obtiene un porcentaje de volumen muerto muy pequeño, por lo cual se espera una elevada eficiencia en este sistema. En la tabla 21 se presentan los resultados del modelo de dispersión de Levenspiel.

**Tabla N°.21-** Valores obtenidos según el modelo de dispersión y del índice de variación de Levenspiel para el sistema híbrido

<b>Valores de <math>(D/u^*L)</math></b>	
<b>Modelo recipiente cerrado</b>	<b>Modelo recipiente abierto</b>
0,0084	0,070
Dispersión muy BAJA -Flujo real	Dispersión BAJA- Flujo disperso
Tiende a RFP	Comportamiento entre RMC-RFP
<i>Grado de dispersión- índice de Levenspiel</i>	0,04

En el sistema híbrido, la presencia del medio disminuye considerablemente la mezcla en el sistema y tiene así predominio de flujo pistón. Sin embargo, la presencia de la biopelícula en el medio, podría distorsionar la distribución del tiempo de residencia en el reactor, lo cual no ha sido comprobado. El examen detallado de

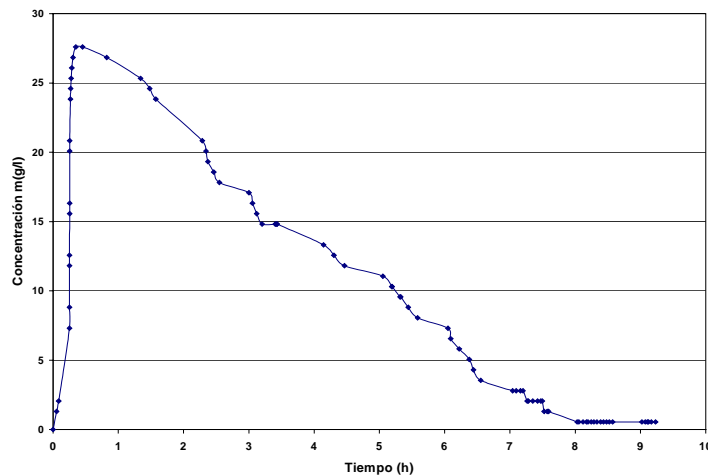
estas características es complicado, puesto que requiere un modelo especial que explique satisfactoriamente la interacción entre el trazador y la biopelícula, lo cual debe ser objetivo de estudios posteriores. (Hamoda, 1987)

Estos resultados confirman los anteriores: predominio de flujo pistón, lo cual implica baja dispersión. Adicionalmente se observa que el modelo de recipiente cerrado permite un mejor ajuste de las características hidráulicas de este sistema.

Por último se puede comentar que la presencia del medio disminuye considerablemente la mezcla dentro del sistema y permite un comportamiento de flujo real disperso y que el comportamiento de las partículas es similar al flujo pistón. El medio permite obtener resultados similares aquellos cuando el sistema presenta baffles. (Iida, 1988)

- **Sistema de lodos activados:**

A continuación, en la figura 22, se presentan la curva de concentración en función



**FIGURA 22: Comportamiento de la concentración del trazador a la salida del sistema de lodos activados**

del tiempo para el sistema de lodos activados.

Se puede observar en la figura 22 que el pico se presenta aproximadamente a los 30 min. del inicio de la prueba. Este tiempo corresponde al 5% del tiempo total de la prueba, por lo tanto se puede afirmar que esta pequeña diferencia se debe al tiempo



de inyección del trazador y que el comportamiento es típicamente de reactor mezcla completa.<sup>(Iida, 1988)</sup>

Esto lo confirman los valores elevados de la varianza ( $\sigma^2$ ) y la desviación estándar, los cuales indican una gran amplitud alrededor de la media. El factor acéntrico indica una curva altamente asimétrica, como se espera en un sistema con flujo mezcla completa.

Esta información estadística se presentan a continuación en la tabla 22.

**Tabla N°.22-** Evaluación de los parámetros estadísticos para el sistema de lodos activados

<b>Media (<math>\mu</math>)</b>	3,64
<b>Varianza (<math>\sigma^2</math>)</b>	6,67
<b>Relación <math>\sigma^2/\mu^2</math></b>	0,50
<b># de tanques ideales en serie (N)</b>	2,01
<b>Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</b>	2,58
<b>Factor acéntrico (<math>\gamma</math>)</b>	12,27

El valor de N indica que según el modelo de tanques en serie, tiende a dos tanques completamente mezclados, lo cual confirma el marcado predominio del tipo de régimen hidráulico ya mencionado.

En la tabla 23 se presentan los resultados de los tiempos de retención en este sistema.

**Tabla N°.23-** Resultados de los tiempos de retención para el sistema de lodos activados

<b>Promedio-Caudal (l/min)</b>	0,94
<b>Tiempo de retención Teórico (h)</b>	5,66
<b>Tiempo de retención Experimental (h)</b>	3,64
<b>% Desv</b>	36 %

Como se observa en la tabla 23 el tiempo que permanecen las partículas dentro del sistema de lodos activados es bastante menor que el teórico, lo cual implica que dichas partículas salen del sistema un 36 % antes del momento en que se espera que salgan, a diferencia del sistema híbrido que prácticamente no presenta diferencias entre el valor teórico y el experimental.

A continuación se presentan los resultados de aplicar el modelo de Wolf Resnick.

**Tabla N°.24-** Valores obtenidos según el método de Wolf Resnick simplificado para el sistema de lodos activados

<b>Porcentaje de RFP</b>	25,97 %
<b>Porcentaje de RMC</b>	74,02 %
<b>Volumen muerto</b>	3 %
<b>Volumen efectivo</b>	97 %

Los valores de estos parámetros indica un bajo porcentaje de espacios muertos combinado con un flujo mezclado. El sistema tienen un elevado porcentaje de volumen efectivo, por lo cual es lógico esperar obtener excelentes resultados de la evaluación de los mismos. Para confirmar el tipo de flujo predominante en los sistemas se aplica el modelo de dispersión y el modelo de variación de Levenspiel, que se presentan en la tabla 25.

**Tabla N°.25-** Valores obtenidos según el modelo de dispersión y del índice de variación de Levenspiel para el sistema de lodos activados

<b>Valores de <math>(D/u*L)</math></b>	
<b>Modelo recipiente cerrado</b>	<b>Modelo recipiente abierto</b>
0,265	0,154
Dispersión ALTA -Flujo mezclado	Dispersión MEDIA- Flujo mezclado
Tiende a RMC	Tiende a RMC
<i>Grado de dispersión- índice de Levenspiel</i>	0,58

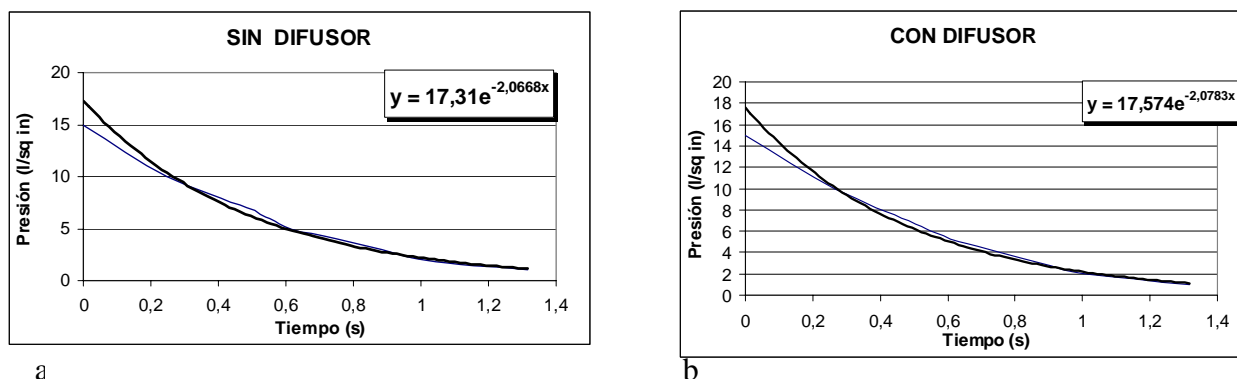
En la tabla 25 se observa la confirmación del régimen predominante en cada sistema. En el sistema de lodos activados predomina el régimen de mezcla completa. También se puede concluir que, al igual que en el sistema híbrido, el modelo de recipiente abierto se ajusta mejor a los sistemas evaluados. Esto coincide con lo esperado, pues realmente son recipientes abiertos.

Adicionalmente y, luego del estudio completo se concluye que existen cortocircuitos en el sistema, como en todo sistema con flujo real disperso. Esta evaluación de las características hidráulicas de los sistemas es de gran ayuda a la hora de analizar los resultados de eficiencia obtenidos en los sistemas. El resto de la evaluación hidráulica completa se presenta en la sección de anexos C.

### 5.2.2 Evaluación del sistema de aireación:

En la evaluación de los sistemas de aireación en este trabajo se utiliza una adaptación de filtros de agua de diámetro de poro de 25 micras como difusores. El suministro de aire se realiza mediante un compresor, el cual tiene instalado un manómetro de lectura amplia.

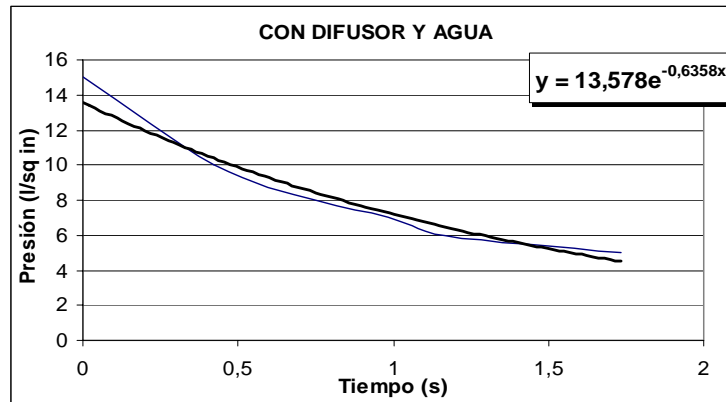
En la figura 23 se presenta la variación de la presión del compresor al descargar el mismo, con el objeto de evaluar la resistencia del difusor en el tanque vacío, lo cual se pone de manifiesto en la figura mencionada.



**FIGURA 23: Evaluación de la influencia de los difusores en el funcionamiento De los sistemas evaluados**

Se observa que la presencia del difusor no influye en el tiempo que demora el compresor en liberar el flujo del aire hacia los sistemas. En la figura 24 se muestra la

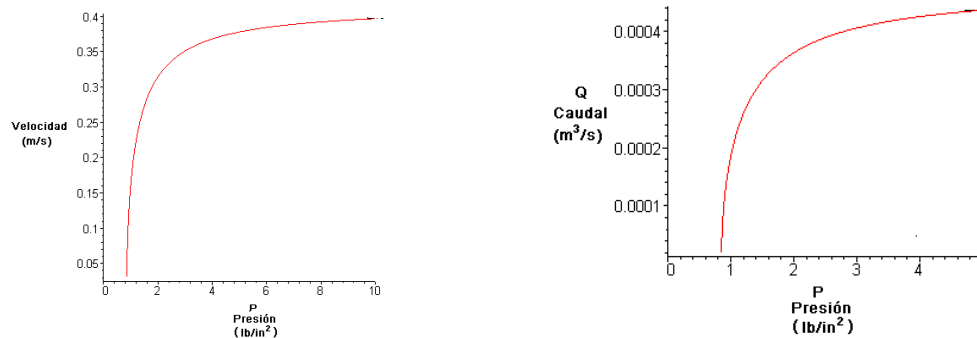
resistencia de que ofrece la columna de agua en el tanque al flujo de aire, la cual implica una caída gradual de la presión respecto al tiempo. Por lo tanto, la columna de agua aumenta el tiempo de descarga del flujo de aire del compresor. Entonces está es la variable de influencia en el sistema de aireación.



**FIGURA 24:** Evaluación de la influencia de los difusores y la columna de agua en el funcionamiento de los sistemas evaluados

Posteriormente se realiza la evaluación del manómetro como instrumento de regulación del flujo de salida, utilizando como herramienta auxiliar Maple®. Los requerimientos de aire se obtienen, según las ecuaciones de cinética del sistema de lodos activados, en unidades de caudal.

En la figura 25 se presenta la curva de velocidad del aire con respecto a la presión que se fija en el manómetro, así como el caudal asociado a esa presión, suponiendo comportamiento de gases ideales.



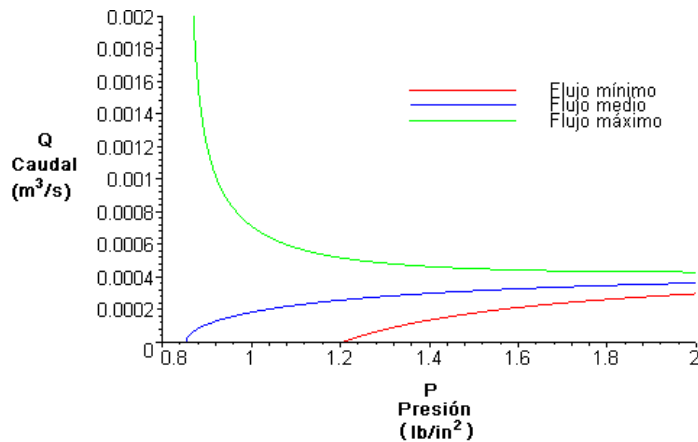
**FIGURA 25:** Curvas de calibración de la velocidad (izquierda) y del caudal (derecha) del aire en función de la presión del manómetro

La figura 26 muestra los valores típicos, máximos y mínimos de la función de caudal (Q) en función de la presión (P):

$$Q = f(P)$$

Para obtener estos valores se le asigna a la función anterior un error conocido como L. Esta función de error se obtiene por medio de derivadas parciales asignando un  $\Delta T$  (temperatura),  $\Delta P$  (presión) y  $\Delta H$  (altura de la columna de agua), variables que influyen en la función.  $Q = f(P) \pm L$ .

La presión registrada por el manómetro depende a su vez de la presión ejercida por la columna de agua, la presión atmosférica y la temperatura del agua. La figura 26 indica que en el sistema de aireación utilizado, para valores de presión  $>1,8$  psia es cuando el valor típico, máximo y mínimo de la curva caudal en función del tiempo comienzan a coincidir, por lo tanto el instrumento de regulación de aire no permite cuantificar el caudal suministrado, con un cierto grado de confiabilidad. Ante este hecho, los requerimientos de aire fueron supervisados midiendo el oxígeno disuelto presente en ambos sistemas diariamente. En el caso del sistema de lodos activados este valor se mantiene entre 1-2 mg/l y en el sistema híbrido entre 3-4 mg/l.



**FIGURA 26:** Valores de los caudales de aire para el sistema de aireación empleado en este trabajo.

### 5.3 Evaluación comparativa por etapa de los sistemas:

A continuación se describen los resultados de la etapa de arranque:

### 5.3.1- Arranque: Formación de la biomasa:

En esta etapa de formación de la biomasa, la información se presenta en cuatro secciones: parámetros fisicoquímicos, variación de los sólidos (Sedimentables y Suspendidos Volátiles (SSVLM)) en ambos sistemas, comparación de la biomasa presente en ambos sistemas y comparar de la eficiencia de remoción durante el arranque.

#### 5.3.1.1 Parámetros fisicoquímicos:

En la fase de arranque se realiza diariamente la determinación de las propiedades fisicoquímicas: pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto (OD). A continuación se presentan en la figura 27, 28 y 29 el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos.

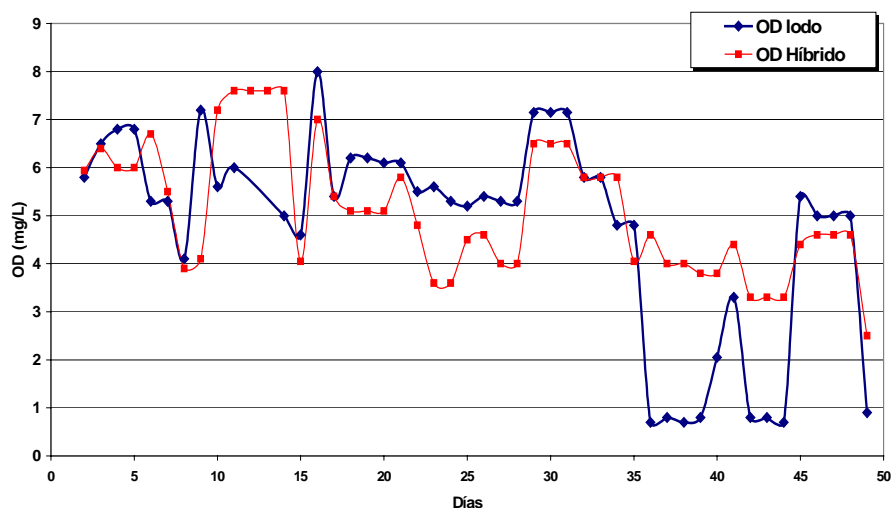


FIGURA 27: Variación del OD en los sistemas durante el período de carga

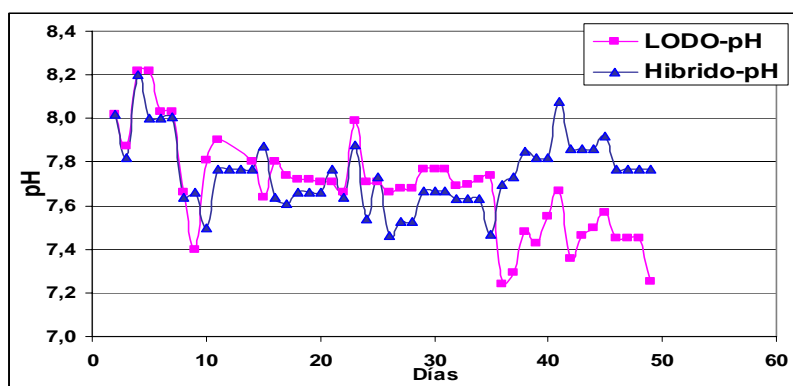


FIGURA 28: Variación del pH en los sistemas durante el período de arranque

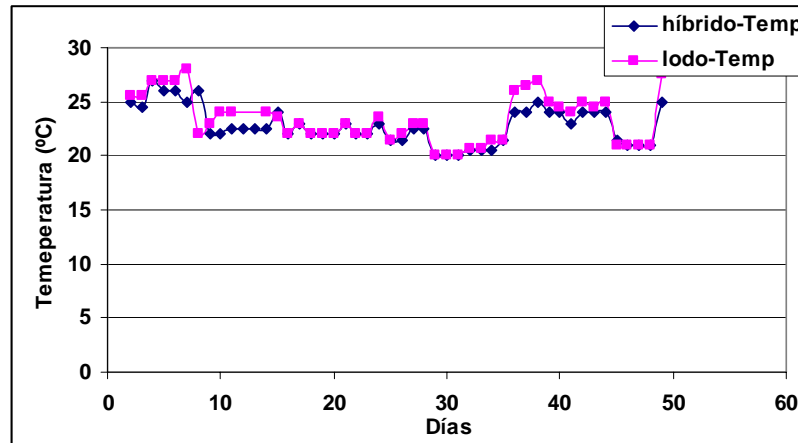
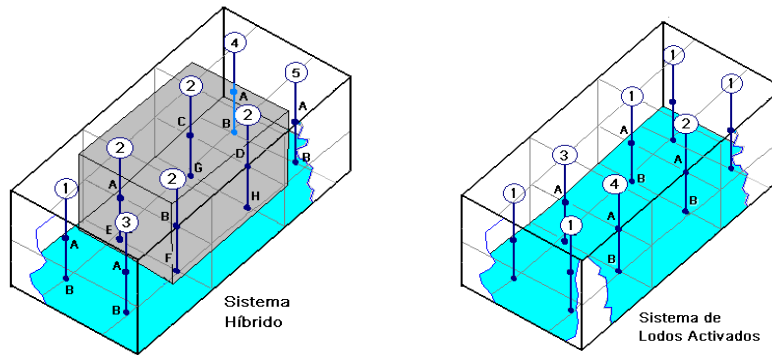


FIGURA 29: Variación de la temperatura en los sistemas durante el período de arranque

En general, los parámetros fisicoquímicos no presentan variación significativa que mencionar. De esta información de rutina, el parámetro de mayor interés y el cual aporta información útil a la hora de optimizar el proceso es el OD. Es importante señalar dos aspectos resaltantes: el arranque de los sistemas se realiza en dos oportunidades, debido a problemas operacionales. La información del primer arranque permite optimizar el segundo. El flujo de aire permanece constante durante esta etapa en ambos sistemas, para establecer las características de los mismos, sin introducir perturbaciones adicionales. Luego de 48 h del inicio del arranque todos los días a la misma hora se realiza un perfil de concentración de Oxígeno, el cual consiste en medir en varios puntos de los sistemas el OD y verificar así que la distribución del mismo es uniforme. Una determinación característica de cada sistema, así como el gráfico respectivo de los puntos seleccionados en cada tanque se presenta a continuación. El resto de la información se presenta en los anexos.

En la figura 30 se aprecia que en el sistema híbrido los puntos de medidas situados en el interior del medio tienen igual numeración (2) sólo por convención. Las diferentes profundidades (30 y 60 cm) se identifican con letras.



**FIGURA 30:** Diagramas de los puntos para determinar el OD en los sistemas

En la tabla 20 se presenta un ejemplo de los perfiles obtenidos para ambos sistemas en una de las diferentes mediciones.

**Tabla 20.-** Resultado del perfil de OD en los sistemas evaluados (03-12-03)

Lodo Activado		Híbrido			
Punto	OD (mg/l)	Punto	OD (mg/l)		
1a	6,8	1a	6,5		
1b	6,6	1b	6,4		
2a	6,8	2a	5,5	2e	6,6
2b	6,8	2b	7,1	2f	6,8
3a	6,7	2c	6,4	2g	6,6
3b	6,7	2d	6,6	2h	6,6
4a	6,8	3a	6,8	4a	6,8
		3b	7	4b	7
4b	6,9	5a		6,8	
		5b		7	

La tabla ejemplo corresponde a la primera medición. Esta evaluación da como resultado que los sistemas tienen un perfil uniforme de concentración de OD, esto es especialmente importante, en el híbrido el cual debido a la presencia del medio, como ya se menciona en la sección de análisis preliminar, presenta menor agitación que el lodo, sin embargo la distribución del OD es bastante uniforme.

Para intentar reducir el tiempo de arranque de los sistemas se determina en varias oportunidades el Oxígeno Disuelto (OD) durante el tiempo de carga. Las determinaciones se realizan durante las primeras 5 horas y pueden variar cada minuto,



cada cinco minutos, como cada media hora o una hora, según la velocidad con la cual la concentración de oxígeno cambia. Con la información de la variación de la concentración de oxígeno disuelto en los tanques a través del tiempo se realiza un gráfico como el siguiente:

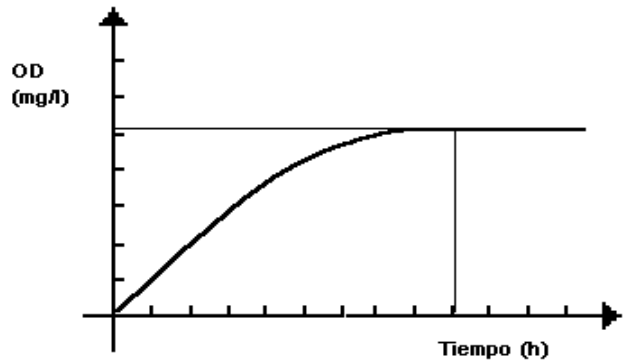


Figura 31: Esquema del comportamiento típico del Oxígeno Disuelto durante la carga

Una de las curvas obtenidas de OD en función del tiempo para cada sistema evaluado se presentan a continuación en las figuras 32 y 33.

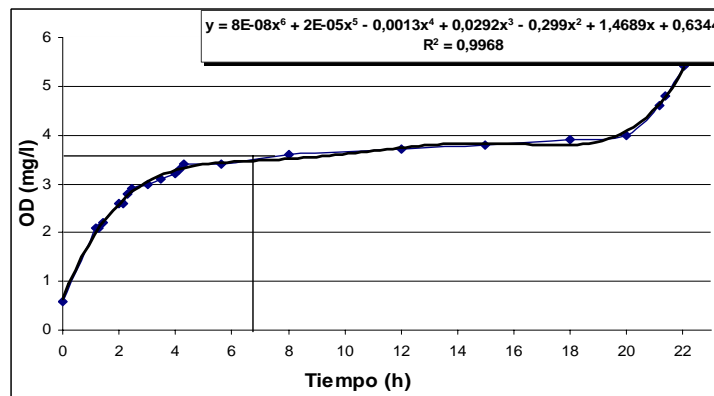


FIGURA 32: Gráfico del comportamiento del OD para el sistema híbrido durante el arranque

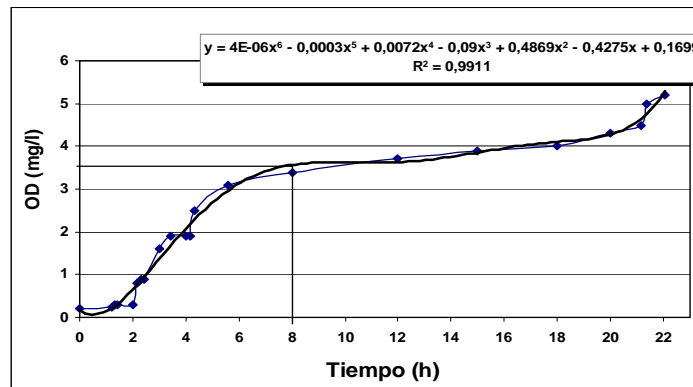


FIGURA 33: Gráfico del comportamiento del OD para el sistema de lodos activados durante el arranque

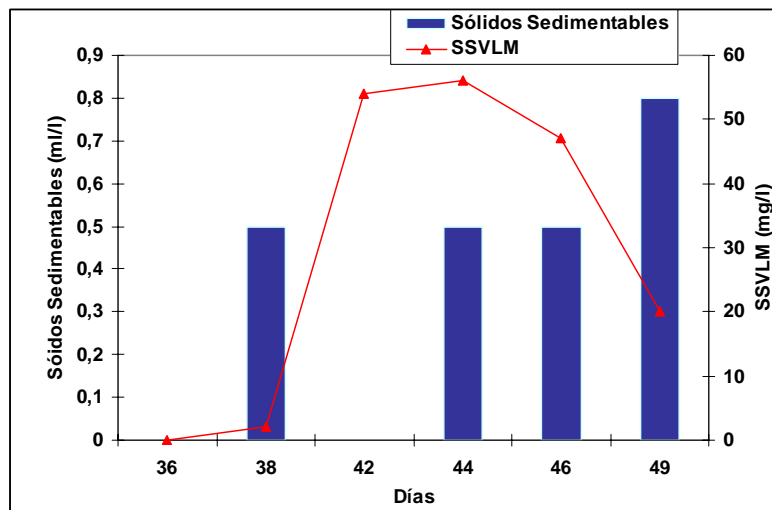
En el punto en el cual la concentración de oxígeno se estabiliza y tiende a un valor asintótico, indica el momento en el cual se requiere una nueva carga. Esto se debe a que los microorganismos presentes en el agua consumen el OD presente en el agua para degradar la materia orgánica y de allí obtener energía para su reproducción y funciones vitales. Cuando se agota la materia orgánica, ya no se consume más oxígeno y este tiende a un valor asintótico. Si se alarga demasiado el período de aireación en el sistema, sin la presencia de material a degradar, puede presentarse un proceso de auto-digestión y los sólidos tienden a disminuir.

Al realizar el seguimiento de este parámetro durante tres semanas y analizar posteriormente las curvas obtenidas, las cuales se encuentran en su totalidad en la sección de anexos, se concluye que aproximadamente entre las 6 y 8 horas posteriores al inicio de la carga se consume la mayor parte del material presente y continuar el proceso de aireación no reporta crecimiento alguno en la biomasa presente. Esto implica que se requieren tres cargas diarias para poder agilizar el proceso de crecimiento. Se considera este aspecto, pero realizar tres cargas no es viable en las condiciones de operación. Entonces de acuerdo al momento de máxima carga orgánica en el afluente se establece un itinerario de dos cargas en las últimas tres semanas, cuando los sistemas requieren una cantidad de alimento mayor. Las cargas duran aproximadamente 8 h la primera y 12 h la segunda; pues una se realiza a las siete de la mañana y otra a las cuatro de la tarde.

### **5.3.1.2 Variación de los Sólidos Sedimentables y SSVLM en ambos sistemas:**

#### **• Sistema Híbrido**

Es importante señalar que los sólidos sedimentables son despreciables en el sistema híbrido durante el arranque. Sin embargo, es importante señalar que cada semana parece que existe un desprendimiento de biopelícula, pues la concentración de sólidos aumentan cada 7 días aproximadamente. Además a medida que aumenta la concentración de biomasa en la biopelícula, el pico es más pronunciado. Esto se puede apreciar en la figura 34.



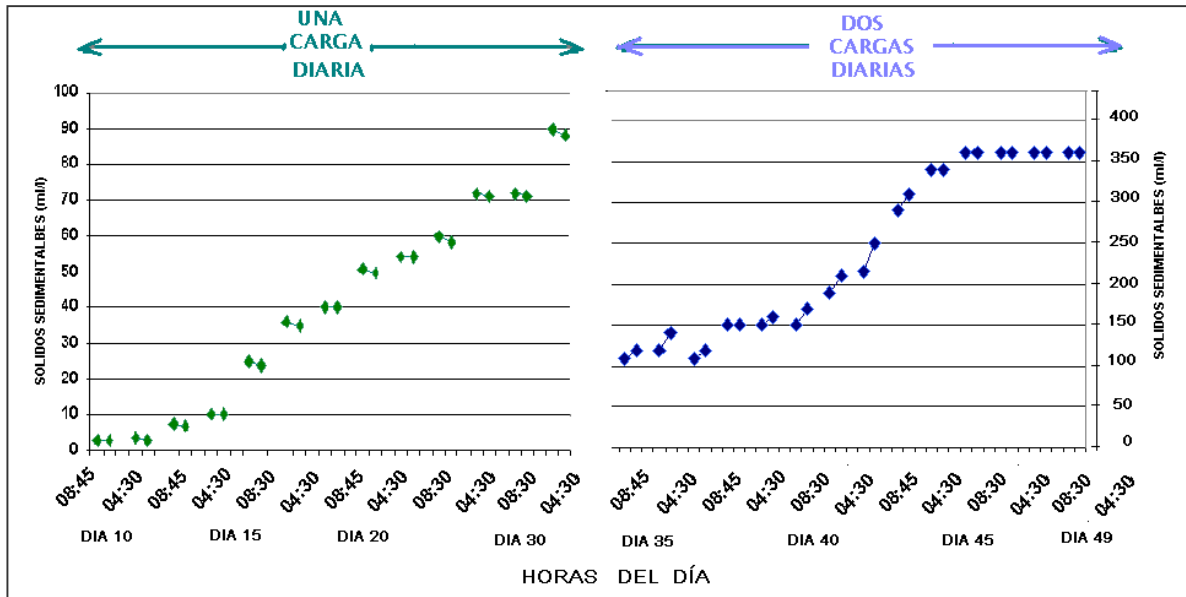
**FIGURA 34:** Gráfico del comportamiento de los Sólidos Sedimentables y SSVLM para el sistema híbrido durante el arranque

Asimismo, también se aprecia que tanto los sólidos suspendidos volátiles como los sedimentables son despreciables en este sistema.

- **Sistema de lodos activados:**

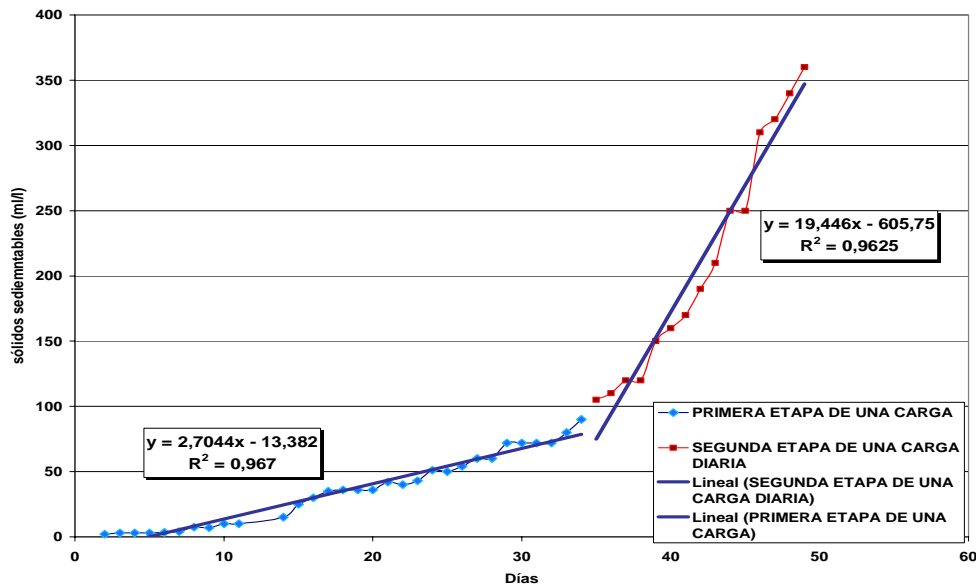
En el sistema de lodos activados el crecimiento de los sólidos suspendidos se ve influenciado por el cronograma de cargas. Se puede ver la diferencia en la tasa de crecimiento cuando se realiza una carga, que cuando se realizan dos. Además parece implicar que la biomasa presente se acostumbra al régimen de cargas y crece de acuerdo a la disponibilidad de alimento y a la frecuencia con la cual se le suministra.

En la figura 35 se aprecia que la tasa de crecimiento es menor cuando se realiza una carga. Cuando se realizan dos aumenta hasta cierto valor máximo, luego tiende a disminuir, hasta que a elevadas concentraciones se detiene el crecimiento. En este instante se puede decir que la fase de arranque ha concluido y la biomasa se encuentra en capacidad de operar continuamente.



**FIGURA 35:** Gráfico de la tasa de crecimiento los Sólidos Sedimentables para el sistema de lodo activados durante el período de

Es importante señalar para concluir este aspecto, como el crecimiento de los sólidos es dependiente de la tasa aplicada, en sistemas que manejan altas cargas, algunos autores señala que se puede lograr concentraciones de sólidos de hasta 1800 mg/l en apenas una semana, con una DBO de 500 mg/l. (Gruber, 1988) El método planteado permite optimizar el tiempo de arranque a bajas cargas. En la figura 36 se

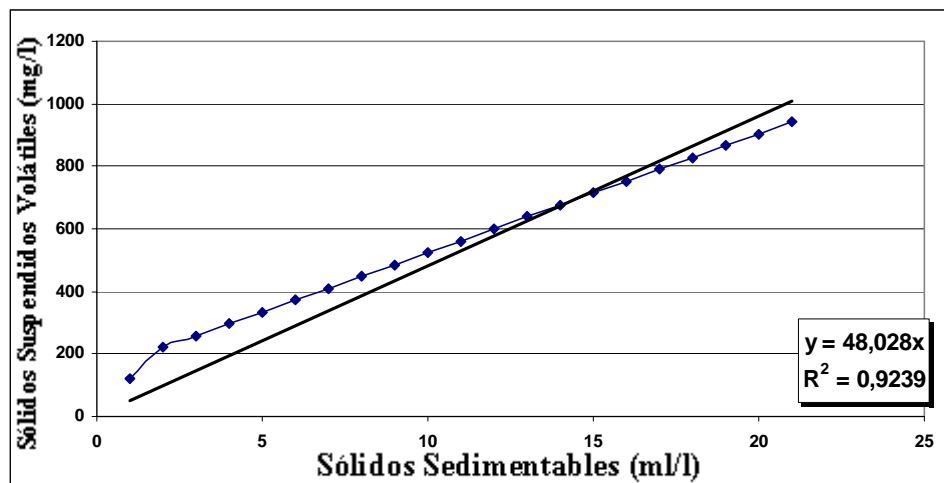


**FIGURA 36:** Gráfico de la pendiente de crecimiento los sólidos usando una y dos cargas para el sistema de lodo activados durante el arranque

puede apreciar la diferencia en la pendiente de crecimiento cuando se realiza una carga a cuando se realizan dos cargas.

Como comentario final de este aspecto se puede decir que utilizar dos cargas es especialmente significativo en el caso del sistema de lodos activados, ya que en el sistema híbrido, la biomasa se adhiere de igual manera en las diferentes modalidades de carga, lo cual significa que el período de arranque en el sistema híbrido es significativamente menor, aproximadamente se alcanza en dos semanas. El sistema de lodos activados requiere aproximadamente 50 días para estar en condiciones de operar continuamente.

Adicionalmente se puede mencionar que la relación entre los sólidos sedimentables y los sólidos volátiles, en el sistema de lodos activados se encuentra entre 11 y 14 %. Esta relación nos lleva a establecer una ecuación característica entre estos parámetros, la cual se puede apreciar en la figura 37.



**FIGURA 37:** Gráfico que presenta la relación entre los sólidos sedimentables y los suspendidos para el sistema de lodo activados durante el primer arranque

Al respecto, se aprecia que la relación entre los sólidos sedimentables y los SSVLM es aproximadamente lineal, con una buena correlación, para el líquido residual evaluado, durante la etapa de arranque. Con estudios más amplios, para diferentes tipos de líquidos residuales y cargas aplicadas, se puede generalizar el uso de los Sólidos Sedimentables como parámetro de control.

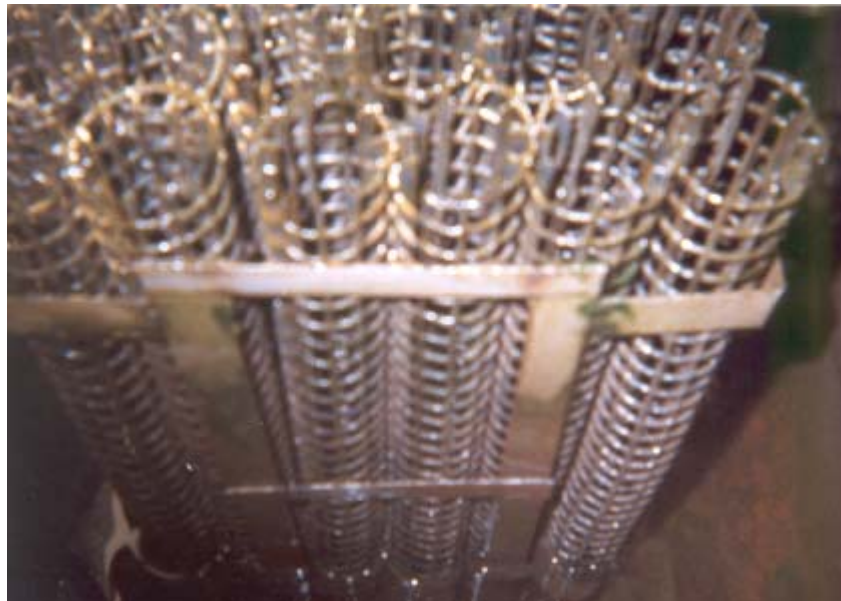
Es importante señalar que en sistemas de lodos activados a escala piloto se puede operar en forma continua cuando se tienen valores de SSVLM entre 500-1200 mg/l. Sin embargo, existen investigadores que han obtenido resultados satisfactorios al trabajar con concentraciones incluso inferiores a estos valores. (Finamore, 1999) (Eckenfelder, 1970)

### 5.3.1. 3 Comparación de la biomasa presente en ambos sistemas:

En esta sección se comentan las características del lodo del sistema de lodos activados y de la biopelícula en el caso del híbrido, pues en éste no existe suspensión significativa.

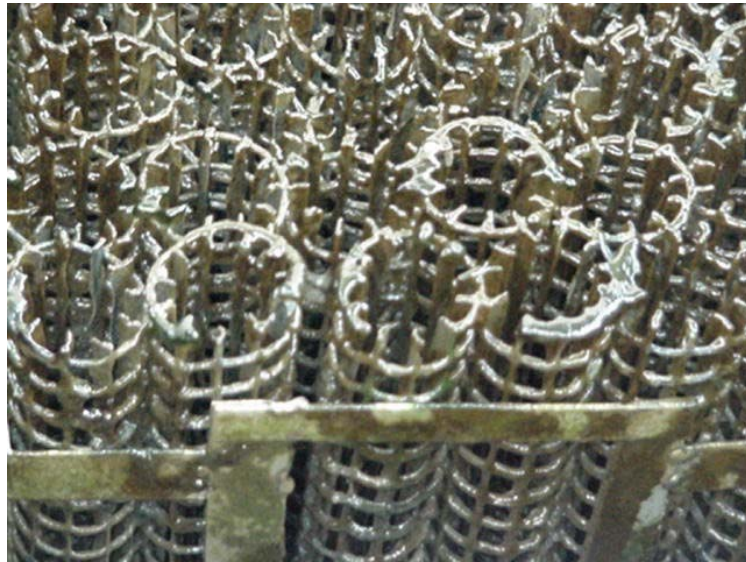
- **Sistema Híbrido**

La biopelícula aparece por primera vez a los dos días en el medio, en la parte superior, en forma de filamentos de color crema. En la primera semana aparece espuma en la superficie del tanque, tal como lo refiere algunos autores. (Lessel, 1994). Al retirar el sobrenadante al principio se aprecia como una sombra sobre el medio, lo cual parece indicar que la película inicialmente desaparece, porque no ha desarrollado las características de adhesión apropiadas. La biopelícula en las primeras cargas se aprecia en la figura 38.



**FIGURA 38:** Fotografía de la biopelícula a los 10 días de inicio de la operación por cargas

La película completamente formada, es decir en toda la superficie del medio se presenta a las dos semanas, tal como ocurre tanto en la experiencia de Lessel <sup>(Lessel, 1994)</sup> como en la experiencia de Müller. <sup>(Müller 1998)</sup> Es importante mencionar que a partir del día 11 del arranque el híbrido presenta un sobrenadante muy claro, con la proliferación excesiva de cladóceros.



**FIGURA 39:** Fotografía de la biopelícula a los 27 días de inicio de la operación por cargas

En los últimos días de crecimiento la parte superior de la película presenta aspecto verdoso. El flóculo de la película es cerrado y la diversidad en microorganismos es mayor, incluso presenta los organismos más elevados en la cadena trófica como nemátodos. Además de la vorticellas y rotíferos, se pueden apreciar opercularia, suctoria, acineria, gastrotrichia, entre otros, tal cual lo refiere Müller. <sup>(Müller, 1998)</sup> El aspecto de la biopelícula se aprecia en la figura 38. Se puede ver una biopelícula fina, de aspecto verdoso.

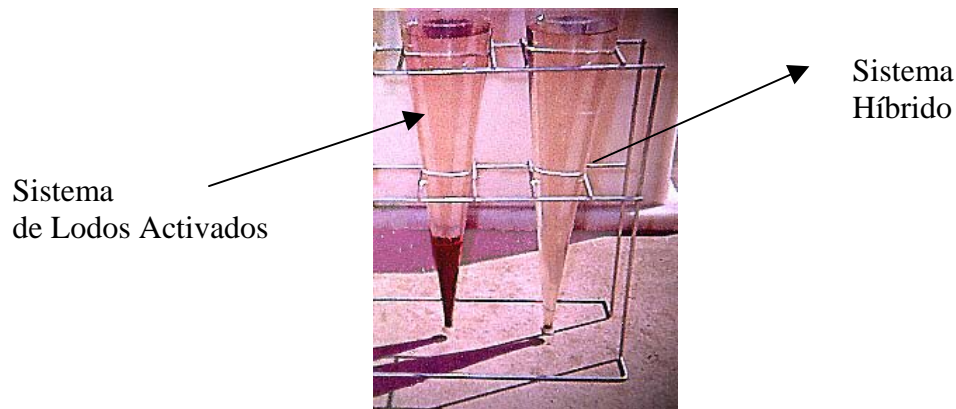
Por lo tanto el método de carga permite formar biomasa no sólo de características morfológicas apropiadas, sino también biológicas.

#### **Sistema de lodos activados:**

El lodo aparece a las 48 h aproximadamente, (sólidos sedimentables = 1 ml/l) Este lodo es de color marrón claro y de aspecto fino.

En el caso del lodo en el día 12 de la carga aparecen 10 ml/l de lodo de rápida sedimentación y elevada capacidad de compactación. En las observaciones microbiológicas presenta aspecto redondeado, el flóculo es cerrado y presencia de vorticelas y rotíferos; éstos indican buen estado del sistema; paramecios, los cuales indican que el sistema opera a bajas cargas. (Eikelboom, 2000)

Luego de 15 días el lodo en el sistema es de color marrón claro, compacto, bastante robusto y definido. En la figura 40 se aprecia una foto comparativa de los conos de Imhoff.



**FIGURA 40:** Fotografía de los conos de Imhoff a los 15 días de inicio de la operación por cargas

Es importante recordar que en el sistema híbrido el medio presenta una película uniforme en toda su extensión y que esto ocurre a las dos semanas de iniciar la operación, (Müller, 1998) pero como el lodo activado requiere una cierta cantidad de biomasa, el seguimiento se realiza a ambos sistemas y la operación continua se inicia sólo cuando el lodo se encuentra apto para el cambio.

La relación entre los sólidos suspendidos volátiles y los sólidos suspendidos totales en esta etapa es de 42 % en el sistema híbrido y de 65 % en el sistema de lodos activados. Dicha relación confirma que la fracción volátil es menor en el sistema híbrido, debido a proceso de mineralización, tal como lo presenta Müller. (Müller, 1998)



### 5.3.1.4 Comparación de las eficiencias de remoción durante el arranque (Sistemas operando por cargas):

Se presentan las eficiencias de remoción a diferentes tiempos de carga, para verificar el momento en el cual se consume la biomasa presente en los sistemas. Esta evaluación permite comprobar cual sistema presenta mayor porcentaje de remoción, durante el proceso de arranque.

Tabla 27: Eficiencias de remoción en función del tiempo de carga para los sistemas evaluados.

			Lodo		Híbrido	
FECHA	Tiempo De Carga (h)	DBO <sub>A</sub> (mg/l)	DBO <sub>E</sub> (mg/l)	% de Remoción	DBO <sub>E</sub> (mg/l)	% de Remoción
16/12/03	4h	122	63	48	26	79
	23h		39	68	13	89
05/01/04	8h	108	9	92	5	93
07/01/04	12h	159	12	92	10,5	95
12/01/04	12h	118	8	92	17	86
15/01/04	8h	145	21	84	20	85

De la información presente en la tabla 27 se puede comentar que a las 4 h se ha consumido la mayor parte de la carga aplicada, aspecto resaltante para el sistema híbrido el cual consume el 79 % en las primeras 4 horas. Es decir, entre las 4 y 23 h sólo se consume un 20 % adicional en el sistema de lodos activados y un 10 % en el sistema híbrido. Esto confirma la suposición que, cuando existe baja carga en el afluente, la mayor parte de la degradación ocurre en las primeras 4 a 6 h. Entonces una carga cada 6 - 8 h optimiza el proceso de arranque, en ambos sistemas. Algunos autores señalan que en la formación de biomasa a partir de aguas residuales domésticas la velocidad de degradación se duplica en las primeras 4 h, para ir decreciendo a medida que disminuye el sustrato. (Jácome, 2001)

Esto lo confirma el hecho de que a las 8 h ya ha desaparecido el 92 % de la carga aplicada, en la mayoría de los casos.

En relación a las características organolépticas del sistema de lodos activados, se puede mencionar que el olor desaparece al finalizar la carga, aproximadamente 8 h después. También el aspecto pasa de turbio a transparente. Estas características se esperan al operar un lodo activado por cargas. (Castoreña, 2001)

En el caso del sistema híbrido, el olor y el aspecto turbio desaparecen a las 4 horas de iniciar la carga. En la tabla 28 se puede apreciar que los porcentajes de remoción no aumentan entre 4 y 23 h, como ya se había mencionado. Adicionalmente se puede comentar que excepto en el último caso, siempre el porcentaje de remoción del híbrido es mucho mayor. En relación al tiempo de carga, se puede ver que entre 8 y 12 h la diferencia de eficiencias es prácticamente despreciable.

Sistema	SSVLM	Sólidos Sedimentables	DBO			
			4h	8h	12h	23h
Lodo	220	22	65 %	----	----	68 %
Híbrido	0	0	85 %	-----	----	91 %
Lodo	864	120	----	92 %	-----	-----
Híbrido	54	0	-----	95%	-----	-----
Lodo	1136	140	----	----	92 %	-----
Híbrido	70	0	-----	-----	93 %	-----
Lodo	1328	210	----	86 %	----	-----
Híbrido	56	0	-----	86 %	-----	-----
Lodo	1328	210	----	----	93 %	-----
Híbrido	56	0	-----	-----	86 %	-----

Tabla 28: Porcentajes de remoción de DBO en relación a los sólidos presentes en los sistemas.

En la tabla 28 se puede observa que la remoción que presenta el sistema híbrido se debe a la biopelícula, pues los SSVLM son despreciables. En la tabla 29 se puede observar la eficiencia de remoción del sistema en función de la DQO para los sistemas estudiados.

Tabla 29: Eficiencias de remoción de DQO en los sistemas durante el arranque

SISTEMA	Día	Muestra	DQO		
			DQO <sub>A</sub>	DQO <sub>E</sub>	% REMOCIÓN
Híbrido	16/01	Efluente	186	23	88%
Lodo	16/01	Efluente		23	88%
Híbrido	05/01	Efluente	189	13	93%
Lodo	05/01	Efluente		13	93%
Híbrido	12/01	Efluente	177	13	93%
Lodo	12/01	Efluente		13	93%
Híbrido	15/01	Efluente	240	38	84%
Lodo	15/01	Efluente		25	90%

En el caso de la eficiencia de remoción de DQO se puede apreciar que es aproximadamente igual para ambos sistemas. Adicionalmente se puede mencionar que los rangos de remoción de la DBO y la DQO también son muy próximos entre sí, durante la fase de arranque.

### 5.3.1. 5 – Puesta a punto de los sistemas:

Esta etapa tiene como finalidad que los sistemas logren acostumbrarse a la operación continua. Es lógico esperar cambios y/o oscilaciones de los parámetros medidos.

La evaluación propiamente dicha se inicia en la siguiente sección, con la modalidad de aireación extendida, para luego aplicar condiciones de carga mayores en las etapas siguientes.

### 5.3.1.5.1. Parámetros fisicoquímicos:

A continuación se presentan en las figuras 41, 42, 43 que muestran el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos durante esta etapa.

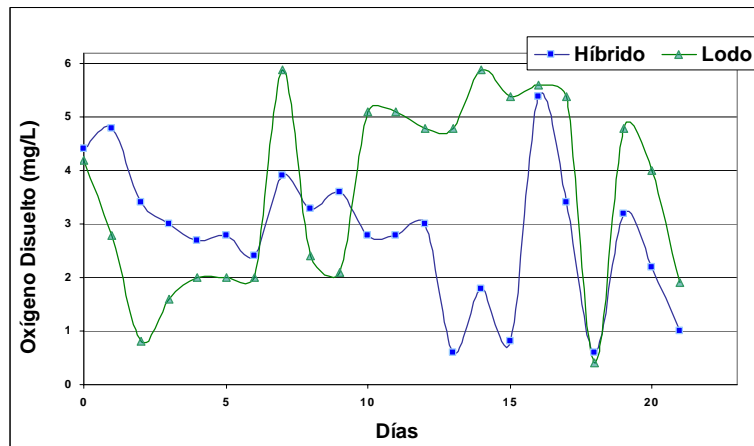


FIGURA 41.- Comportamiento del OD en los sistemas durante esta etapa

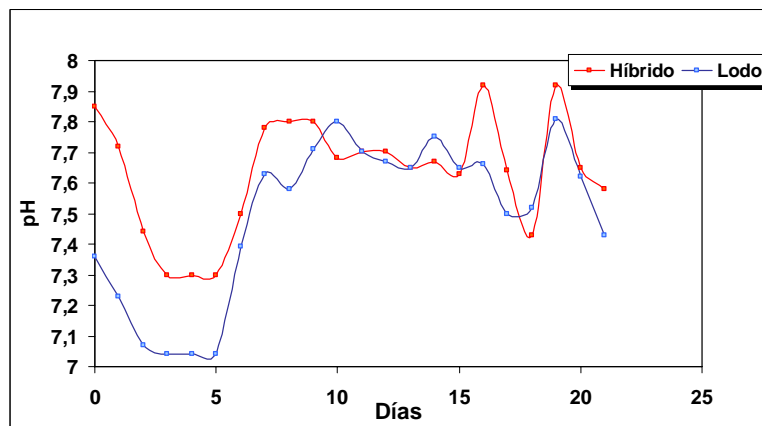


FIGURA 42.- Comportamiento del pH en los sistemas durante esta etapa

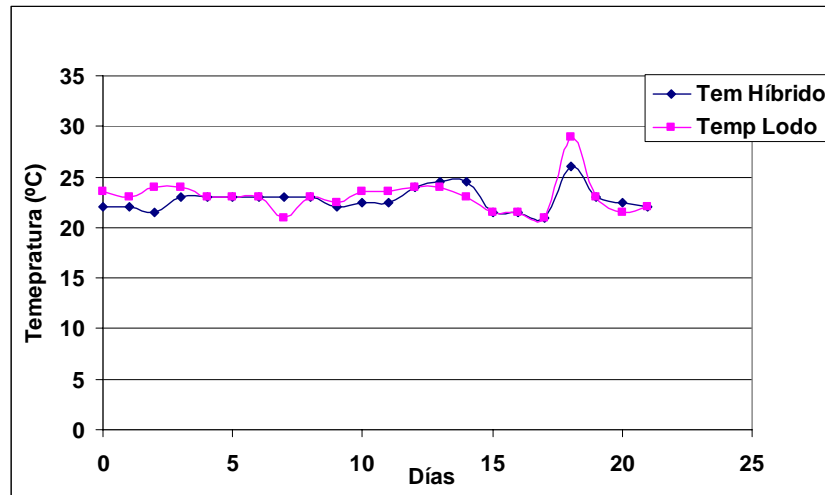


FIGURA 43.- Comportamiento de la temperatura en los sistemas durante esta etapa

En las figuras 41, 42 y 43 se aprecia que el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos se encuentra dentro del rango esperado. En la figura 41 se puede observar que existen bajas bruscas en el OD, lo cual se debe a fallas en el suministro de aire. El suministro y transferencia de oxígeno en el sistema híbrido condiciona la velocidad de degradación del sustrato presente. <sup>(Hamoda, 1987)</sup> En la figura 42 se aprecia que en todo momento el pH se mantiene en valores entre 7 y 8, como se espera en estos sistemas. En la figura 43 se observa que la temperatura no sobrepasa los 25°C, excepto en un valor puntual de 27 y 29°C, para el híbrido y el lodo respectivamente.

### 5.3.1.5.2. Parámetros de operación en la puesta a punto de los sistemas

Las condiciones de reciclo, purga y tiempo de retención hidráulico ( $\theta_h$ ) bajo las cuales se conduce la puesta a punto en condiciones continuas, se presentan en la tabla 30, evidentemente coinciden con las requeridas en la primera modalidad o etapa a evaluar. El promedio de caudal en los sistemas se aprecia en la tabla 34.

Tabla 30.- Parámetros de operación en los sistemas durante esta etapa

SISTEMA	Tiempo de Retención Hidráulico ( $\theta_h$ )	Relación de Reciclo (%)	Tiempo de Retención Celular ( $\theta_c$ )
Híbrido	15 h	50	N.A.
Lodos Activados	15 h	40	25

N.A. = No aplica

### 5.3.1.5.3 Características de los sistemas al iniciar esta etapa:

A continuación se presentan imágenes que muestran las condiciones de los sistemas al iniciar esta etapa. En la figura 44 se aprecia que los sistemas son diferentes en su aspecto al iniciar la etapa; en el sistema híbrido, el líquido presenta menos agitación. También presenta aspecto diferentes y no se distingue el medio dentro del tanque.



FIGURA 44.- Aspecto de ambos tanques el día de inicio de la operación continua. Híbrido (izquierda) lodos activados (derecha)

En la figura 45 se observa la gran cantidad de sólidos presentes en el sistema de lodos activados, a diferencia del sistema híbrido que no presenta una concentración significativa de sólidos sedimentables.

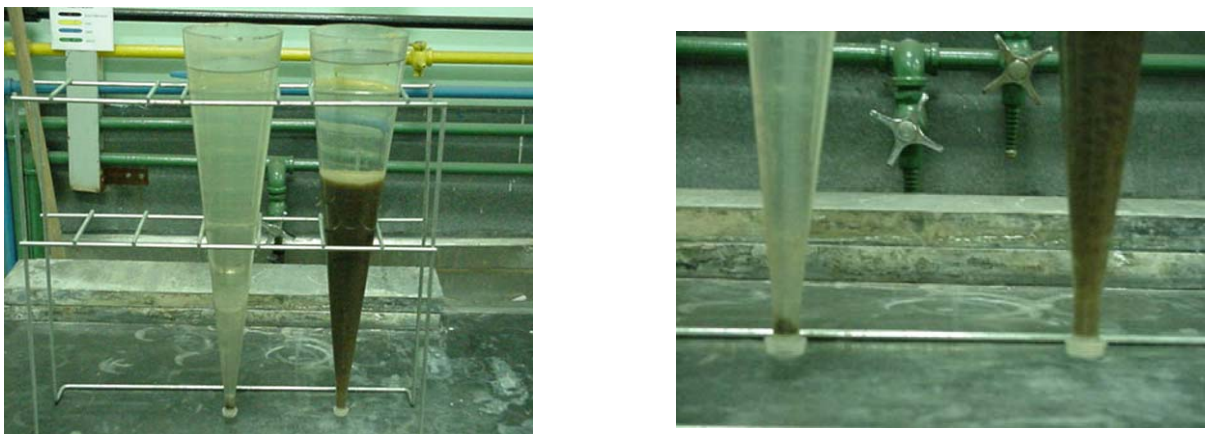


FIGURA 45.- Sólidos sedimentables al inicio de esta etapa en los sistemas.

En la imagen 46 se puede observar que la película presenta color marrón, que es densa, que cubre completamente el medio. Además su aspecto se presenta como pequeños filamentos. (imagen izquierda). En la imagen de la derecha se presenta otra zona de la película.



FIGURA 46.- Dos vistas de la biopelícula al inicio de la etapa de puesta a punto

En relación a las observaciones microscópicas, la película presenta mayor diversidad de microorganismos: vorticellas, paramecium, rotíferos, aspidiscas, nemátodos y algas filamentosas que le dan estructura al floc. Este es compacto y redondeado. Por el contrario el sistema de lodos activados presenta un flóculo poco redondeado, abierto y con poco diversidad biológica. En general este es el aspecto de los sistemas al iniciar la operación continua.

#### **5.3.1.5.4 Comportamiento de los sólidos en los sistemas**

A continuación se presentan las características del comportamiento de los sólidos en cada sistema y luego una comparación entre las características de ambos.

- **Sistema híbrido:**

A continuación en la figura 47 se presenta el comportamiento de los sólidos sedimentables en el sistema híbrido.

Se puede observar en la figura 47 que los sólidos sedimentables no pasan de 10 ml/l en este sistema durante esta etapa. Lo interesante a señalar aquí es que continúa el patrón mostrado en el arranque, en el cual cada 8 ó 10 días el sistema presenta un incremento en los sólidos sedimentables, lo cual puede indicar que está cambiando la biopelícula. Con respecto a los SSVLM son despreciables. Cabe destacar, que el rango de sólidos suspendidos volátiles en el sistema híbrido se encuentra entre 500 y 1000 mg/l con valores máximos de 2500 mg/l cuando se aplican cargas orgánicas superiores a 500 mg/l, en función de DBO. (Jacome, 2002)

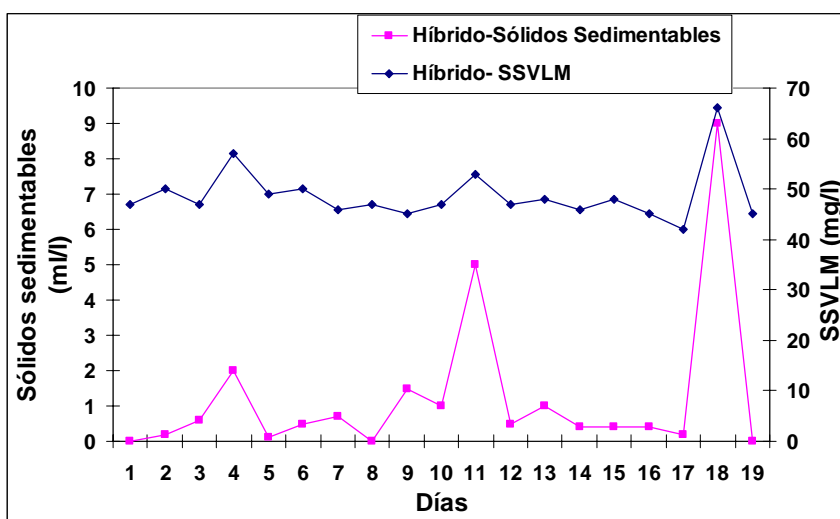


FIGURA 47.- Comportamiento de los sólidos durante el período de puesta a punto para el sistema híbrido

Es interesante señalar que los máximos en la curva de los sólidos sedimentables coincide con los máximos en SSVLM, lo cual puede implicar que el aumento, en la concentración de ambos sólidos, se debe a la película desprendida y no a suspensión real presente en el sistema. Además se puede afirmar que los sólidos suspendidos totales y volátiles en el sistema híbrido son despreciables. Entonces se puede decir que el sistema se opera como un sistema híbrido, pero se comporta como un lecho aireado sumergido, pues no presenta suspensión significativa. (Jacome, 2001a)

Con respecto al momento en el cual se presentan los sólidos sedimentables en el híbrido, en la figura 48 se observa el aspecto de los mismos, los cuales a simple vista



presentan características diferentes a los sólidos típicos. Mientras estos son marrones y pequeños, este sedimento es grisáceo y granulado, de mayor tamaño y sedimentación compacta y rápida, indicando que es la biopelícula desprendida. Los sólidos típicos no sedimentan de forma compacta, sino en una especie de espiral. (Bishop, 1995)



FIGURA 48.- Aspecto de los sólidos en el momento que se presenta el máximo de Sólidos Sedimentables.

• **Sistema de lodos activados:**

En la figura 49 se presenta el comportamiento de los sólidos para este sistema en esta etapa. Se puede apreciar que los sólidos decaen bruscamente y el sistema se estabiliza en una cantidad de aproximadamente 50 ml/l. La cantidad de sólidos suspendidos volátiles también baja, como se aprecia en la figura 48, lo cual pone de manifiesto que el sistema se ve afectado por el cambio tan brusco en las condiciones de operación.

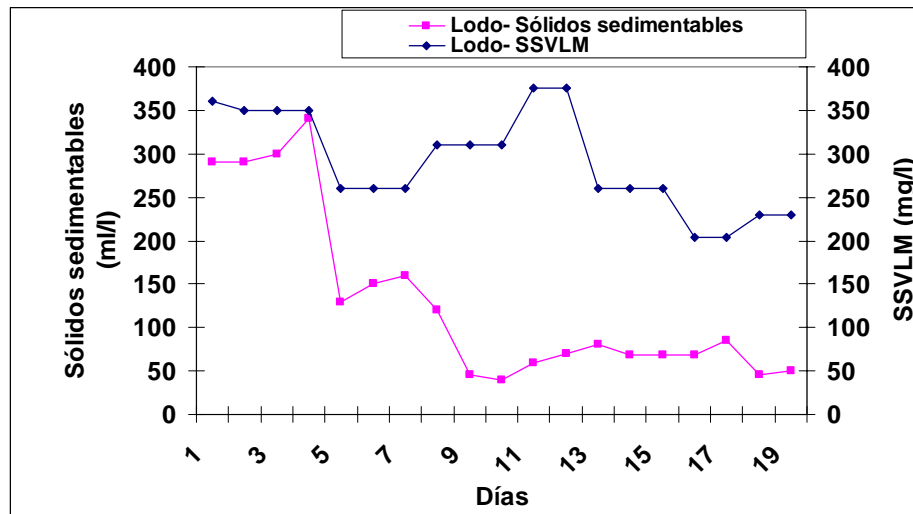


FIGURA 49.- Comportamiento de los sólidos durante el período de puesta a punto para el sistema de lodos activados

La relación SSVLM/SSTLM se encuentra entre 71 y 75 %, lo cual coincide con los resultados obtenidos por otros autores que trabajan con sistemas de lodos activados a escala piloto. <sup>(Jun Fan, X et al, 1996)</sup> Al microscopio se presenta un flóculo abierto, poco denso y liviano. En los días cercanos a la estabilidad, las características mejoran considerablemente. Aunque el lodo presenta un color marrón más oscuro que en el arranque y su sedimentabilidad disminuye considerablemente. La microfauna presenta también cambios, disminuyendo su diversidad.

#### **5.3.1.5.4.1 Comparación entre la biopelícula y el lodo presente en los sistemas en esta etapa.**

Es importante señalar que las características del lodo, del sistema de lodos activados, cambiaron pues su capacidad de sedimentación disminuyó, así como su capacidad de compactación. El flóculo ya no es cerrado, compacto y robusto y la diversidad de microorganismos disminuye. En esta etapa se presenta un fallo en el suministro de aire, que no afecta considerablemente al lodo, el cual recupera su color característico en pocos días. De hecho en la figura 50 se aprecian sus características en el día 4 de operación continua, donde se ve una disminución de la cantidad considerable, respecto a la fase de arranque. Asimismo, se observa orificios en la parte inferior del cono, donde se pone de manifiesto la pérdida de compactibilidad, al abrirse el flóculo.



**FIGURA 50.-** Aspecto del lodo sedimentado a los 5 días de operación continua

También se observa una disminución de los sólidos suspendidos en el sistema, lo cual se debe a que este sedimenta en el fondo del tanque, lo cual requiere a partir de este momento su resuspensión con un dispositivo apropiado diariamente. El flóculo puede destruirse fácilmente mediante acción mecánica, irregular. Además no está definido, pues es muy abierto. <sup>(Sperling, 1997)</sup> Cuando se llega a la estabilidad el lodo recupera su capacidad de compactación, se hace más redondeado, definido, pero la cantidad observada del mismo disminuye. Sin embargo, los

SSVLM no disminuyen, lo cual lleva a suponer que ocupa menos volumen, pero conserva su proporción de componentes volátiles.

También es digno de mencionarse, en el caso del sistema híbrido, que al iniciarse la operación en continuo con reciclo, este cambia las características del agua, ahora se ve más turbia. Adicionalmente se observa inmediatamente la descomposición en el fondo del sedimentador de la película, la cual presenta características anaerobias. Dicha película debe ser desechada, pues al reciclarse consume rápidamente el OD y afecta las condiciones del sistema.

Se presenta un cambio considerable en el aspecto de la biopelícula, por lo tanto este sistema también se ve afectado por cambios en las condiciones. Sin embargo, es importante señalar que el cambio se debe al fallo en el suministro de aire y no por el cambio a condiciones de flujo continuo. Sin embargo, el sistema tiende a la rápida recuperación, pues en cuestión de 3 a 4 horas, el líquido en el sistema pierde el mal olor y la turbiedad, producto del problema mencionado. Este cambio se aprecia considerablemente en la figura 51. En dicha figura se pueden observar las características diversas de la biopelícula durante esta etapa. En dicha figura se observan diferentes parte de la biopelícula como deshilachada.

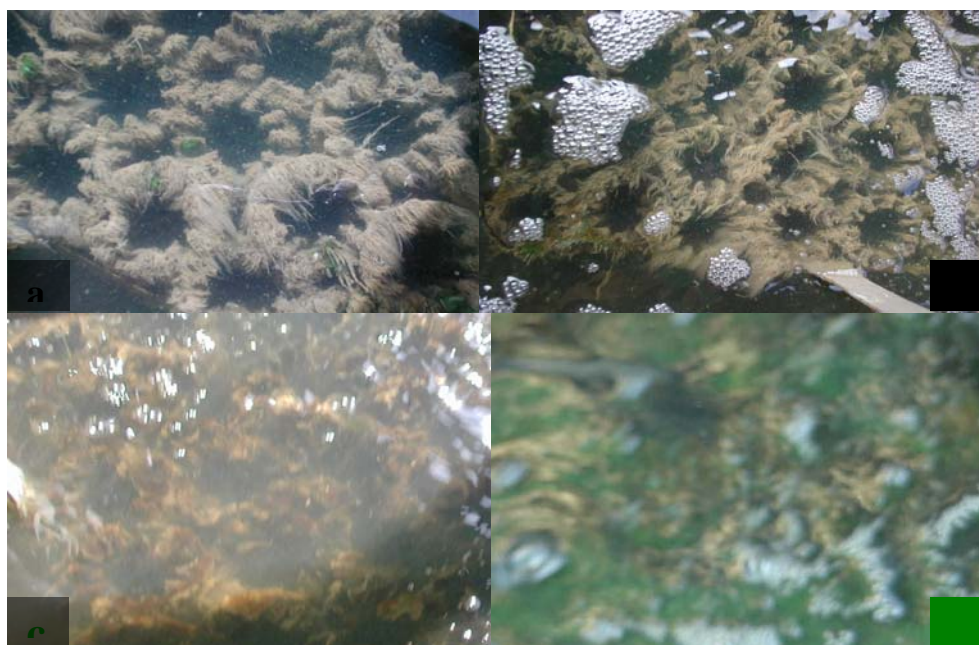


FIGURA 51.- Apariencia de la biopelícula durante la estabilización en continuo

Con respecto a la microfauna en la biopelícula presenta mayor diversidad en el híbrido, pues en el flóculo de la biomasa adherida se pueden apreciar incluso nematodos, que conviven en armonía con los microorganismos.

### 5.3.1.5.5. Comparación de las eficiencias de remoción en los sistemas.

A continuación en la tabla 31 se presenta un resumen de la eficiencia de remoción en DBO para ambos sistemas, durante la fase de puesta a punto.

TABLA 31.- Remoción de DBO en los sistemas durante la puesta a punto

Fecha	DBO afluente (mg/l)	Lodo		Híbrido	
		DBO efluente-lodo (mg/l)	REMOCIÓN (%)	DBO efluente híbrido (mg/l)	REMOCIÓN (%)
28-Ene	131	15	89	10	92
02-Feb	130	10	92	35	73
04-Feb	160	24	85	17	89
09-Feb	141	11	92	27	81

En la tabla 31 se aprecian eficiencias de remoción elevadas en ambos sistemas, a pesar de que no se encuentra en condiciones estables. En el caso del sistema híbrido presenta la mayor remoción en esta fase, la cual se encuentra entre 85-92 %, mientras que en el sistema lodo se encuentra entre 73-92 %. Esta eficiencia de remoción menor, particularmente en los días 2 y 9 de febrero se debe a que en ese momento falló el suministro del aire y el sistema híbrido presenta problemas de oxígeno disuelto, el cual tenía valores muy bajos (ver tabla anexos F). Además el reciclo de película anaerobia perjudica al sistema de manera considerable y demora cierto tiempo en recuperarse. En la tabla 32 se presentan las eficiencias de remoción en función de la DQO para los sistemas estudiados.

Tabla 32.- Resultados de la eficiencia de remoción de DQO para los sistemas estudiados

Fecha	DQO afluente (mg/l)	Lodo		Híbrido	
		DQO efluente-LODO (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN	DQO efluente-HIBRIDO (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
28-Ene	316	84	73	74	77
30-Ene	401	74	82	116	71
02-Feb	433	116	73	169	61
04-Feb	443	148	67	232	48
09-Feb	276	92	67	102	63

En la tabla 32 se aprecia que la remoción de DQO es menor que la de DBO, esto es lógico pues a medida que la biodegradabilidad del agua residual es menor, es decir para relaciones de DBO/DQO bajas, las eficiencias de remoción de estos dos parámetros son diferentes. Esto es frecuente en aguas residuales domésticas. Es importante tener en cuenta que durante la fase de puesta a punto de los sistemas, el control se realiza mediante muestras instantáneas, con la finalidad de decidir cuando se inician las fases experimentales. Dichas muestras están sujetas a cambios puntuales que sufren los sistemas.

### 5.3.2.- Primera Etapa: Aireación Extendida:

Esta etapa dura 13 días y se define su inicio cuando se establece que los sistemas se recuperan del fallo en el suministro de aire. Los sistemas se ven seriamente afectados por fallos en el suministro de aire, sobretodo si se repite en varias oportunidades, como en este caso. Las dos semanas anteriores a la primera etapa, que se describen en la sección previa, representan el tiempo que tardan los sistemas en ajustarse a los impactos generados por modificaciones en la alimentación y el flujo de aire. Esto es especialmente importante en el sistema híbrido, muy sensible a estas alteraciones.

### 5.3.2.1 Parámetros fisicoquímicos

A continuación se presentan en las figuras 52, 53 y 54 la dinámica del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos, es decir, el rango de variación de estos parámetros.

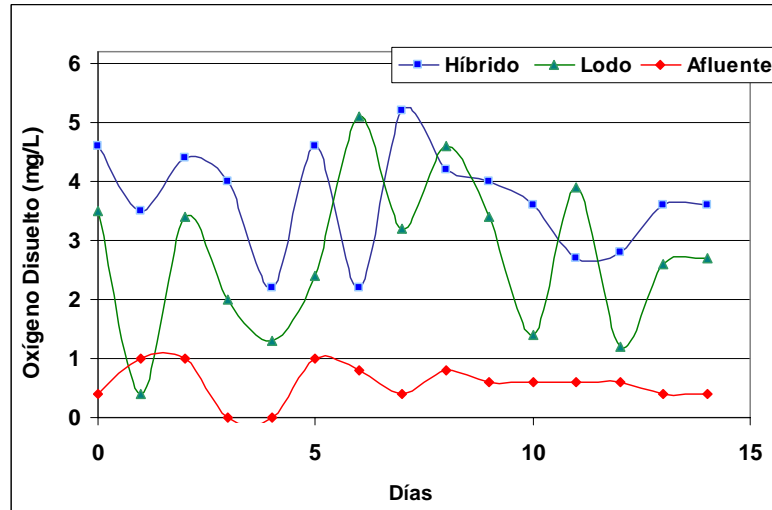


FIGURA 52.- Variación del OD durante la primera etapa para los sistemas estudiados

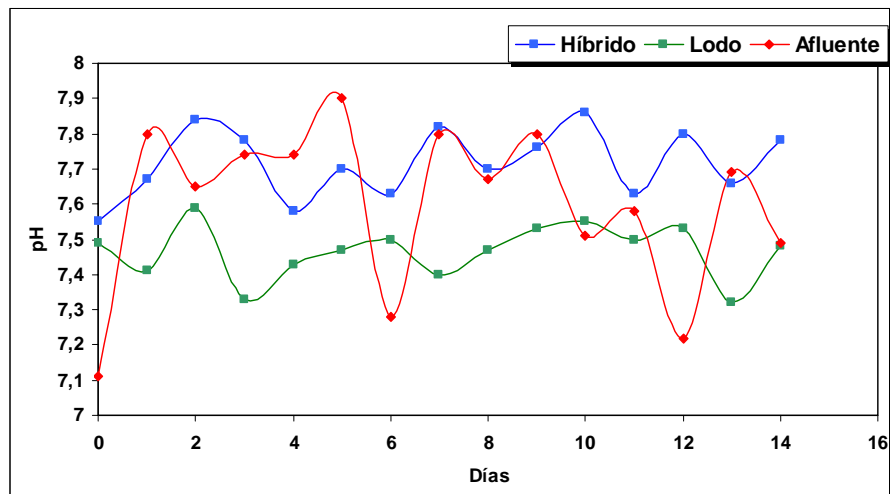


FIGURA 53.- Variación del pH durante la primera etapa para los sistemas estudiados

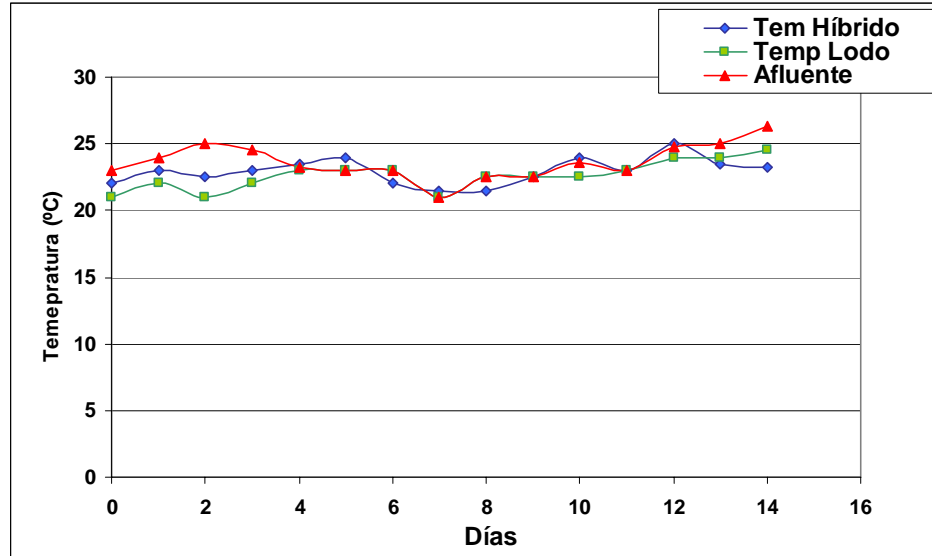


FIGURA 54.- Variación de la temperatura durante la primera etapa para los sistemas estudiados

En la figura 52 se aprecia que en esta etapa el sistema de lodos activados presenta valores de OD que permanecen entre 0,5 y 2 mg/l, valores recomendables para su operación. <sup>(Metcalf and Eddy, 1991)</sup> El sistema híbrido presenta el OD entre 2 y 5 mg/l, con un promedio alrededor de 3, con menos oscilaciones que el sistema de lodos activados. Estos valores coinciden con lo presentado por González-Duque en la evaluación que realizan de un lecho fijo airado sumergido, en la Universidad de México. Estos investigadores operan tres (3) unidades en serie, el primer tanque presenta valores alrededor de 3 mg/l de OD; por el contrario el último, con carga orgánica más baja, presenta valores sobre 7 mg/l. <sup>(González et al, 1992)</sup> Algunos autores, luego de evaluaciones continuas a diferentes concentraciones de aire, han determinado que una concentración mínima de 2 mg/l de OD, permiten obtener resultados satisfactorios. <sup>(Iwai, 1994; Characklis, 1990)</sup> Con respecto a la temperatura, se aprecia en la figura 51, que el rango se mantiene entre 21 y 25 °C. En la figura 53 los sistemas también presentan un rango de variaciones de pH similares a los presentados en la investigación señalada anteriormente. <sup>(González et al, 1992)</sup>

### 5.3.2.2. Parámetros de operación durante la primera etapa:

El tiempo de retención hidráulico para ambos sistemas, se aprecia en la tabla 33. Las relaciones de reciclaje y el tiempo de retención celular son las mismas que en la etapa de puesta a punto.

Tabla 33.- Parámetros de operación en los sistemas durante esta etapa

SISTEMA	Tiempo de Retención Hidráulico ( $\theta_h$ )	Relación de Reciclo (%)	Tiempo de Retención Celular ( $\theta_c$ )
Híbrido	15 h	50	N.A.
Lodos Activados	15 h	40	25

N.A. No aplica

### 5.3.2.3 Comportamiento de los sólidos en los sistemas

A continuación se presentan las características del comportamiento de los sólidos en cada sistema y luego una comparación entre las características de ambos.

- **Sistema híbrido:**

En la figura 55 se presenta el comportamiento de los Sólidos Sedimentables y los SSVLM en el sistema híbrido.

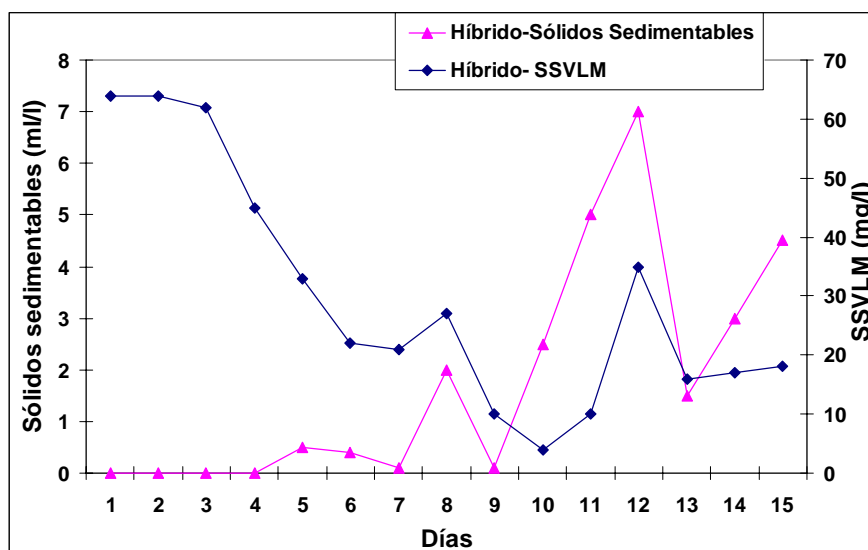


FIGURA 55.- Comportamiento de los sólidos durante la primera etapa para el sistema híbrido

Se puede observar que los sólidos sedimentables se mantienen en proporciones despreciables (0-7 ml/l) en este sistema durante esta etapa. Lo interesante a señalar aquí es que continúa el patrón mostrado en la etapa de puesta a punto, ya que cada semana



aproximadamente aparece una concentración de sólidos mayor con características diferentes. Este incremento de sólidos en el sistema, puede estar asociado al comportamiento de desprendimiento de la biopelícula, aunque para comprobarse requiere un estudio más detallado. Con respecto a la proporción de SSVLM también son despreciables en esta etapa. (0-60 mg/l) No se puede establecer ninguna relación entre ambos parámetros. Es importante señalar que la baja cantidad de sólidos en el sistema tiene relación con un crecimiento excesivo de la biopelícula, ya que los sólidos tienden, con mayor probabilidad, a adherirse más que a mantenerse en suspensión. Además, como se observa en la sección anterior, los máximos de ambos parámetros: Sólidos Sedimentables y SSVLM coinciden de nuevo.

- **Sistema de lodos activados:**

En la figura 56 se presenta el comportamiento de los sólidos durante ésta etapa.

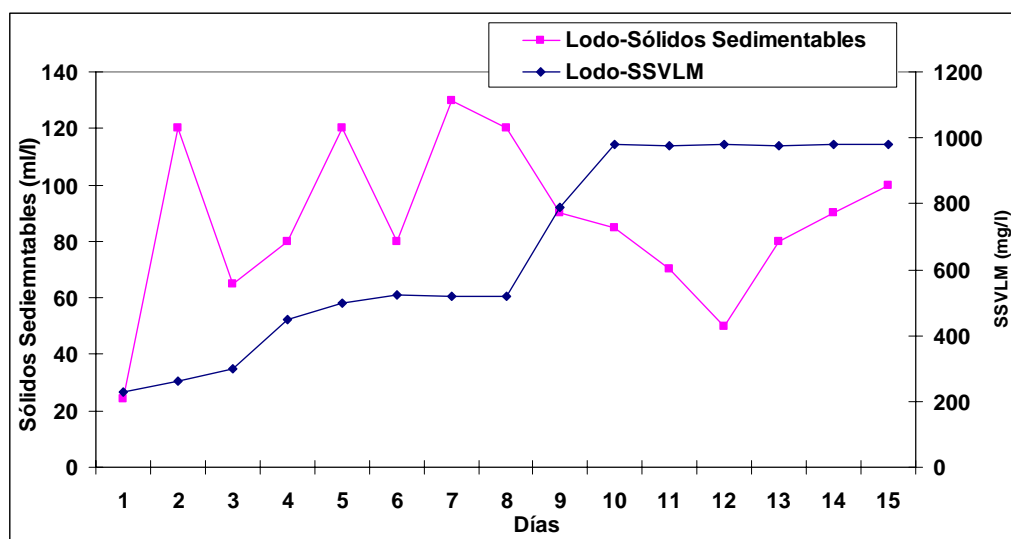


FIGURA 56.- Comportamiento de los sólidos durante la primera etapa en el sistema de lodos activados

En la figura 56 se aprecia que los sólidos sedimentables varían considerablemente desde un valor inicial 20 ml/l al inicio de esta etapa, hasta 100 ml/l al final de la etapa. Se observa que los sólidos suspendidos volátiles se encuentran dentro del rango 500-1200 mg/l que recomiendan algunos autores para estos sistemas. <sup>(Eckenfelder,1970; Huang, J et al, 1984)</sup>. Además

en trabajos como Finamore, 1999; Fernández, 1999 operan sistemas de lodos activados a escala piloto con valores similares a los obtenidos.

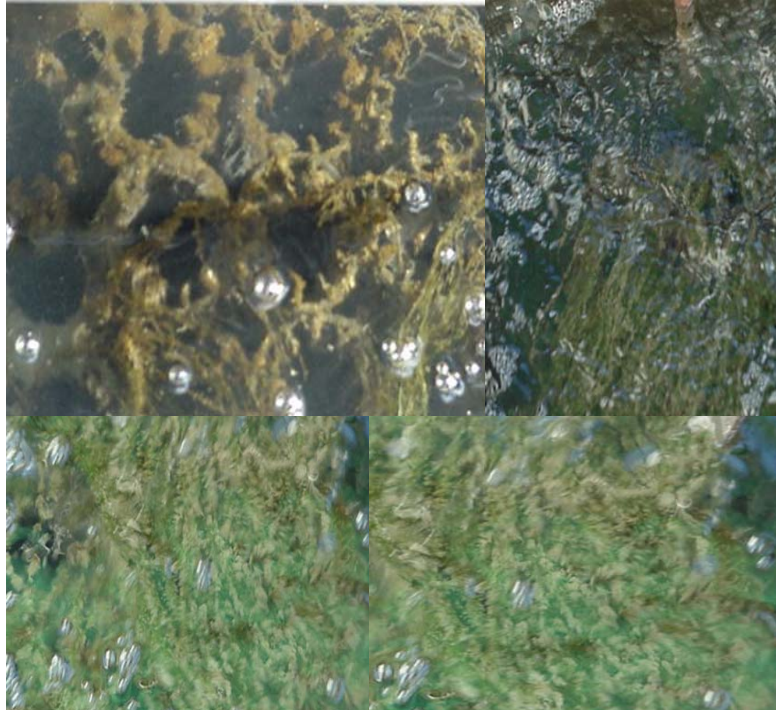
#### **5.3.2.4 Comparación entre la biopelícula y el lodo presente en los sistemas en esta etapa.**

A continuación se presenta en la figura 57 los dos sistemas a una semana de la primera etapa. La imagen presenta un color diferente en el lodo, marrón más tenue. En cuanto al híbrido presenta un color verde, que se debe a la proliferación excesiva de película con formación de algas, las cuales no permiten diferenciar el medio.



FIGURA 57. Imagen de los tanques a la semana de operación de la primera etapa

En la figura 58 se presentan diferentes secciones de la biopelícula, a la semana de iniciar esta etapa. La excesiva proliferación de ramificaciones puede atribuirse al hecho de que el sistema híbrido en esta etapa opera con un flujo de aire bajo, por lo cual tiende a desarrollar una película muy densa, debido a la poca turbulencia. La coloración verde brillante indica predominio considerable de algas, probablemente favorecidas por la presencia de luz solar.



**FIGURA 58.-** Aspecto de la película a la semana de inicio de la primera etapa

El patrón de formación de la biopelícula requiere ser alterado mediante retrolavados cada 45 días aproximadamente, lo cual remueve el exceso de biopelícula y evita que predomine la capa anaerobia, que afecta el comportamiento del sistema. Entonces se recomienda aumentar bruscamente el flujo de aire para desprender la biopelícula excesiva. El lavado debe durar de 10 a 20 minutos, según el espesor de la película. (Jácome, 2002; Crine, 1990) Con respecto a las observaciones microbiológicas el lodo activado presenta menor diversidad que el sistema híbrido, en el cual coexisten mayor número de especies.

### **5.3.2.5 Comparación de las eficiencias de remoción en los sistemas**

En esta sección se comparan las eficiencias de remoción, en relación primero a la DBO y luego a la DQO. Este análisis se realiza en base a muestras instantáneas, las cuales se captan interdiariamente, entre las 10 y 11 de la mañana.

#### **• Resultados de la DBO:**

A continuación se presentan los resultados de la eficiencia de remoción para ambos sistemas en función de la DBO.

En la tabla 34 se aprecia que los porcentajes de remoción se encuentran entre 80 y 90 % en ambos sistemas. Los porcentajes inferiores en el híbrido se debe a la gran proliferación de filamentos que son arrastrados por el efluente e interfieren en el análisis.

Tabla 34.- Remoción de la DBO en los sistemas estudiados durante esta etapa

Fecha	DBO afluente (mg/l)	Lodo		Híbrido	
		DBO efluente (mg/l)	% Remoción	DBO efluente (mg/l)	% Remoción
11-Feb	155	13	92	35	77
13-Feb	154	5	97	16	90
16-Feb	161	11	93	18	89
18-Feb	142	10	93	13	91
20-Feb	118	10	92	5	96
23-Feb	145	6	96	5	97
25-Feb	132	6	95	9	96

### Resultados de la DQO:

En la tabla 35 se aprecia que las eficiencias de remoción de la DQO se encuentran entre 70-80 % para ambos sistemas, un rango de remoción inferior al que presenta la DBO.

TABLA 35.- Remoción de DQO en los sistemas durante la primera etapa

Fecha	DQO afluente (mg/l)	Lodo		Híbrido	
		DQO efluente- lodo (mg/l)	REMOCIÓN (%)	DQO efluente híbrido (mg/l)	REMOCIÓN (%)
11-Feb	317	92	71	102	68
13-Feb	317	82	74	92	71
16-Feb	378	71	81	102	73
18-Feb	327	92	72	102	69
20-Feb	316	55	83	55	83
23-Feb	458	120	74	131	71

### 5.3.2.6 Comparación de los sistemas en estado estacionario durante la primera etapa evaluada: ( $\theta_h = 15$ h; $Q = 0,355$ l/min)

En esta fase la evaluación se realiza utilizando muestras compuestas. Sólo se realizan dos muestreos. Dichos muestreos se realizan los días 26 de febrero y 2 de marzo, respectivamente.

#### 5.3.2.6.1 Parámetros fisicoquímicos

Durante la evaluación, en cada muestreo se realizan mediciones cada hora, durante 24 horas, de los parámetros fisicoquímicos. Esta información se presenta a continuación en las tablas 36, 37 y 38.

Tabla 36.-Variación de los parámetros fisicoquímicos para el afluente de los sistemas empleados

Afluente					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (µS)
<b>Promedio</b>	7,5	1,3	25,5	215	635
<b>Máximo</b>	7,8	0,4	31,0	255	740
<b>Mínimo</b>	7,2	2,5	24,0	165	470

Tabla 37.-Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema de lodos activados

Sistema de Lodos Activados					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (µS)
<b>Promedio</b>	7,5	2,7	24,5	150	580
<b>Máximo</b>	7,6	4,0	25,5	170	640
<b>Mínimo</b>	7,3	1,8	24,0	120	540

Tabla 38.-Variación de los parámetros fisicoquímicos durante la fase estable para el sistema híbrido.

Sistema de Híbrido					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (µS)
Promedio	7,7	3,3	25,0	205	602
Máximo	7,8	4,6	25,7	220	640
Mínimo	7,6	2,2	24,6	180	540

De la información que se presenta en las tablas 37, 38 y 39 se puede observar que los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro del rango esperado. La información completa se encuentra en la sección de anexos.

### 5.3.2.6.2 Comparación de la calidad del efluente obtenido (Eficiencia de remoción)

A continuación se presenta en las tablas 39 y 40 la información relacionada con la eficiencia de funcionamiento de ambos sistemas, en función de la DBO y la DQO

Tabla 39.- Resultados en la estabilidad en función de la DBO

TIPO DE MUESTRA	COMPUESTA				
Sistema	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	82	11	28	17	87
Lodo	82	5	814	660	94
TIPO DE MUESTRA	INSTANTANEAS				
Sistema	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	150	11	28	17	93
Lodo	150	7	814	660	95

Tabla 40.- Resultados en la estabilidad en función de la DQO

TIPO DE MUESTRA	COMPUESTA				
Sistema	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	SSLM (mg/L)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	249	101	28	17	59
Lodo	249	82	814	660	68
TIPO DE MUESTRA	INSTANTANEAS				
Sistema	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	SSLM (mg/L)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	311	91	28	17	71
Lodo	311	67	814	660	78

En las tablas 39 y 40, se aprecia que aunque las eficiencias de remoción obtenidas para las muestras compuestas e instantáneas no reflejan diferencias significativas, es importante señalar que en el caso de la evaluación del sistema de lodos activados, los valores obtenidos coinciden con lo señalado por otros autores, <sup>(Finamore, 1999)</sup> no así en el caso del sistema híbrido, cuyas diferencias probablemente se deben al comportamiento de la biopelícula a lo largo de la evaluación. Esta situación se presenta de manera resaltante en el caso de la determinación de la remoción de materia orgánica, en función de la DQO.

Asimismo, las diferencias de remoción entre la DBO y la DQO son generadas como consecuencia de las características del afluente, en términos del contenido de materia orgánica. La relación DQO/DBO a lo largo de la etapa es superior a 2, lo cual indica la presencia de compuestos susceptibles a ser degradados químicamente y no biológicamente.

En la tabla 41 se observa que la carga orgánica aplicada al sistema híbrido fue de 6,8 g DBO/m<sup>2</sup>\*d, este valor es recomendado por el fabricante para remover sólo materia carbonácea. (8-12 g DBO/m<sup>2</sup>\*d).

Tabla 41.- Cargas aplicadas durante la primera etapa en función de la DQO

Sistema	Híbrido	Lodo
Parámetro	Carga orgánica aplicada (g DBO/m <sup>2</sup> *d)	Carga orgánica aplicada (Kg DBO/Kg SSVLM*d)
DBO	6,8	0,08

En relación al sistema de lodos activados se puede mencionar que, a pesar de que la carga orgánica aplicada es pequeña, se encuentra en el rango recomendado para la modalidad de aereación extendida. Dicha modalidad permite obtener eficiencias mayores del 90 %. (Metcalf and Eddy, 1991)

Entonces las diferencias en eficiencias de remoción obtenidas para el sistema de lodos activados de 94 % y para el sistema híbrido de 87% se deben a lo anteriormente señalado, lo cual evidencia que en bajas cargas el sistema híbrido no desarrolla todo su potencial.

### 5.3.2.6.2 Resultados obtenidos respecto a la conversión de nitrógeno amoniacal:

En la tabla 42 se presentan las concentraciones de nitrógeno orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos en el afluente a los sistemas y los efluentes de los mismos.

Tabla 42.- Resultados en la estabilidad en relación a la conversión de nitrógeno amoniacal

	NTK	NH3-N	NORG	NO2-N	NO3-N	NTOTAL-
<b>Afluente</b>	11,20	5,85	5,35	INAP	0,04	11,24
<b>Híbrido</b>	11,31	8,96	2,35	0,21	0,13	11,65
<b>Lodo</b>	6,25	4,65	1,60	1,36	4,80	12,41

El sistema de lodos activados realiza el proceso de nitrificación, lo cual se confirma el consumo de alcalinidad. Este sistema presenta una eficiencia de conversión de nitrógeno amoniacal de 17 % aproximadamente.

En el caso del sistema híbrido los resultados presentan una incongruencia, pues existe una mayor cantidad de NTK en la salida que en la entrada. Las posibles razones de esta situación puede atribuirse al reciclo de biopelícula anaerobia, la cual podría aporta una cantidad de nitrógeno amoniacal al balance y alterarlo. Esta situación requiere una evaluación detallada, para establecer conclusiones al respecto, la cual no es objetivo de este trabajo.

El sistema híbrido no realiza nitrificación, lo cual coincide con lo señalado por el fabricante. En concordancia, el fabricante recomienda una carga orgánica aplicada más baja, entre 2 y 4 g DBO/m<sup>2</sup>\*d para lograr niveles importantes de nitrificación.



### 5.3.3.- Segunda Etapa: Convencional:

Esta etapa dura 22 días aproximadamente y se define su inicio una semana después de establecer las condiciones de operación de esta etapa. A continuación se presentan las cinco secciones: parámetros fisicoquímico, parámetros de operación, variación de los sólidos, comparación de la biomasa y comparación de las eficiencias.

#### 5.3.3.1 Parámetros fisicoquímicos

A continuación se presentan en las figuras 59, 60 y 61 el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos el rango de variación de los parámetros fisicoquímicos.

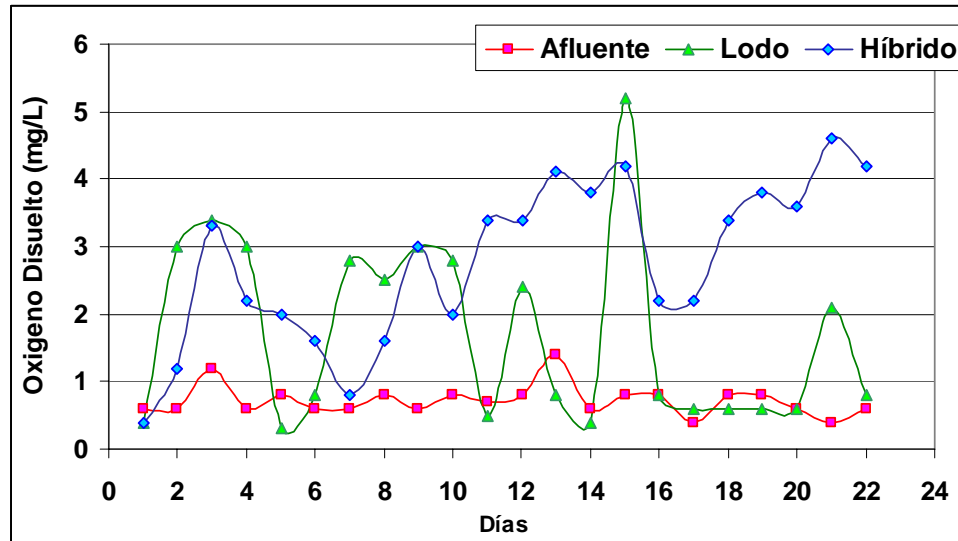


FIGURA 59.- Variación del OD durante la primera etapa para los sistemas estudiados

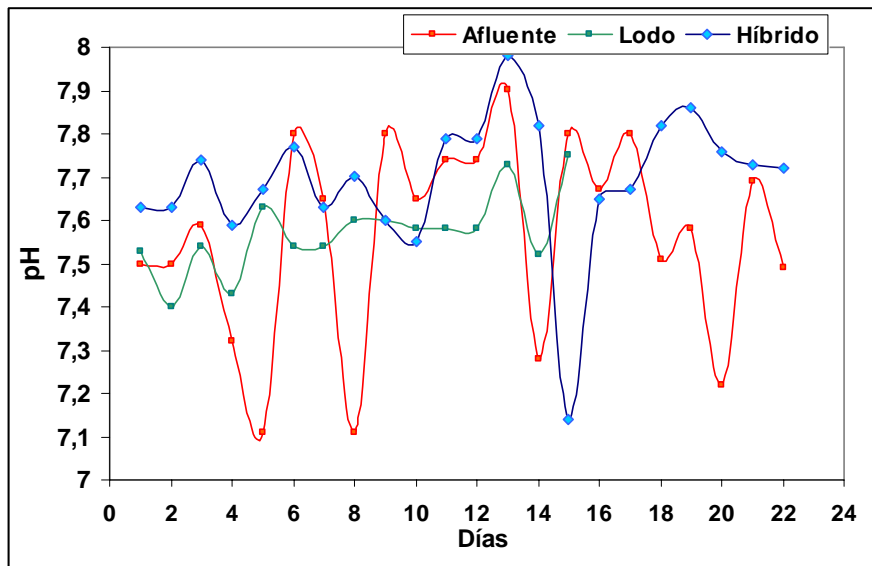


FIGURA 60.- Variación del pH durante la primera etapa para los sistemas estudiados

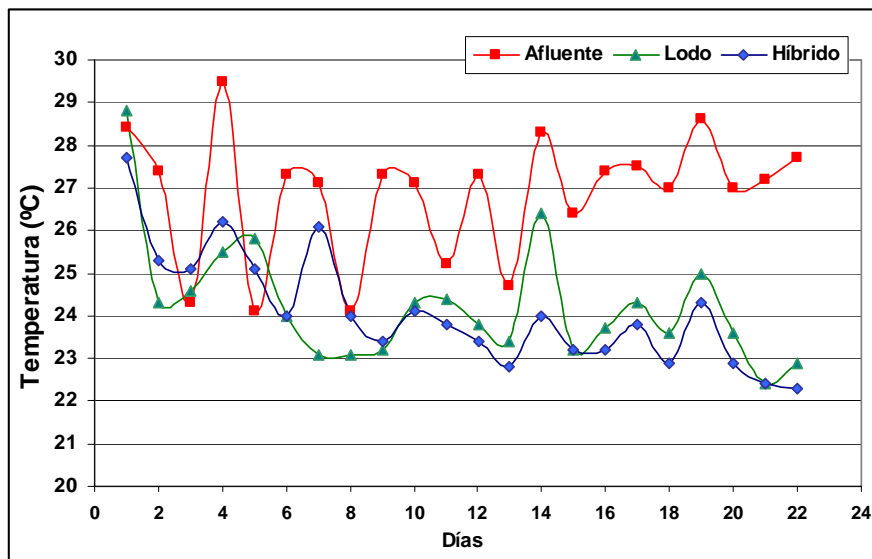


FIGURA 61.- Variación de la temperatura durante la primera etapa para los sistemas estudiados

En la figura 59 se aprecia que en esta etapa la concentración de OD se mantiene en el rango esperado en el sistema de lodos activados. El sistema híbrido presenta, de igual manera que en la etapa anterior, el OD entre 2 y 5 mg/l, con un promedio alrededor de 3. Se puede observar que los máximos en el OD coinciden con los máximos en el afluente, por lo cual se puede afirmar que los cambios en el afluente generan cambios casi instantáneos dentro de los sistemas. Estos valores

coinciden con lo presentado por otros investigadores, los cuales operan en el sistema híbrido con promedios de 3 mg/l. <sup>(Sharek et al, 2001)</sup> En la figura 61 los sistemas también presentan un rango de variaciones de pH similares a los presentados por otros investigadores <sup>(González et al, 1992)</sup>

Con respecto a la temperatura, se aprecia en la figura 61, que el rango se mantiene entre 24 y 30 °C en el afluente, lo cual influye en los sistemas significativamente, pues presentan mayor oscilación en la temperatura que en la etapa anterior. En esta etapa el rango se encuentra entre 22 y 29 °C, mientras que en la etapa anterior se encuentra entre 21 y 25 °C. Este incremento en la temperatura del agua puede afectar considerablemente las condiciones de los sistemas pues, como es lógico, el OD disminuye al aumentar la temperatura. La tasa de transferencia de OD del líquido a la película disminuye al disminuir el OD, por lo cual la tasa de remoción de la materia orgánica se ve afectada. <sup>(Chang, H et al, 1993)</sup> El rango de operación en trabajos similares se encuentra entre 20-25 °C. <sup>(Lessel, 1994)</sup> La diferencia de temperatura antes señalada obliga a aumentar el flujo de aire en el sistema híbrido, para mantener el OD alrededor de 3 mg/l; situación que no se presenta en el sistema de lodos activados.

**5.3.3.2. Parámetros de operación en la segunda etapa:**

En la tabla 43 se presenta el tiempo de retención hidráulico, el tiempo de retención celular y las relaciones de reciclo para ambos sistemas, durante la segunda etapa evaluada.

Tabla 43.- Parámetros de operación en los sistemas durante la segunda etapa

SISTEMA	Tiempo de Retención hidráulico (h)	Tiempo de Retención Celular (d)	Relaciones de Reciclo
Híbrido	10	N.A.	65
Lodos Activados	10	15	40

N.A. = No Aplica

### 5.3.3. 3 Comportamiento de los sólidos en los sistemas

A continuación se presentan las características del comportamiento de los sólidos en cada sistema.

- **Sistema híbrido:**

A continuación en la figura 62 se presenta el comportamiento de los Sólidos Sedimentables y los SSVLM en el sistema híbrido.

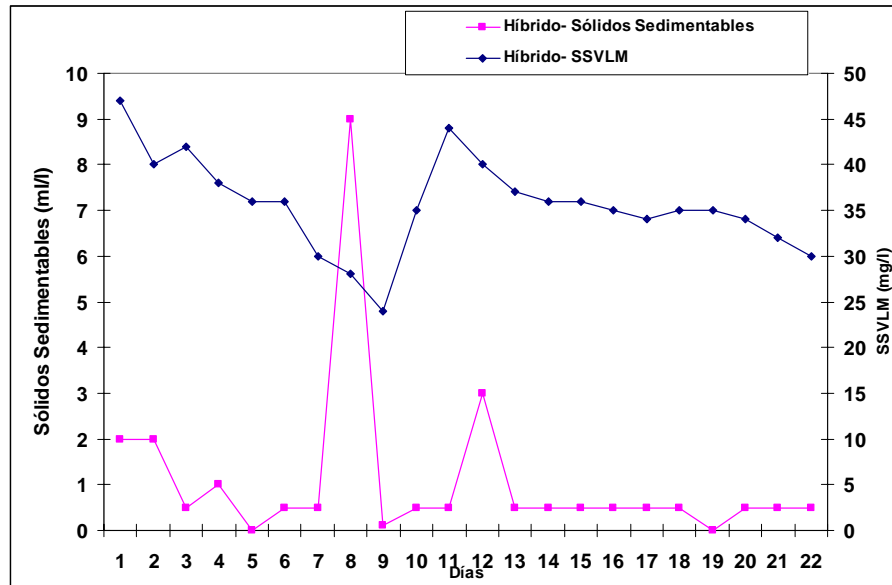


FIGURA 62.- Comportamiento de los sólidos durante la primera etapa para el sistema híbrido

Es importante señalar que antes de iniciar esta etapa se lava la biopelícula, pues el exceso de filamentos verdes no permiten apreciar las características de la película. Además cuando la biopelícula aumenta exageradamente de espesor, la fracción anaerobia ubicada inmediatamente sobre el medio también aumenta, lo cual afecta considerablemente la tasa de remoción de sustrato en el sistema. (Hamoda, 1987).

Cuando se realizan lavados periódicos se realiza control de espesor artificial y se mantiene la película delgada. Cuando no se realiza el lavado, la película se mantiene gruesa y presenta su propio mecanismo de desprendimiento. En este caso el espesor es controlado por la cinética de degradación y el equilibrio entre el crecimiento y desprendimiento de la película. Sin embargo, cuando el sistema no es capaz de

mantener un espesor tal que no aparezcan excesivos filamentos en el sistema, se debe realizar el retrolavado. (Crine, 1990). El retrolavado consiste en inyectar aire en flujo ascendente durante 10 ó 20 minutos.

Se puede observar en la figura 62 que el patrón mostrado en las etapas anteriores, no se aprecia claramente. Se presenta un máximo de 9 ml/l de Sólidos Sedimentables que no coincide con el máximo en los SSVLM. Esto se debe a que el lavado afecta las características de la película. Es importante señalar que el lavado se realiza en dos oportunidades, para lograr desprender el exceso de filamentos suspendidos en el líquido. Esta dificultad para desprender la película indica que la aspereza del medio de soporte es la apropiada y permite a la película mantenerse fija, (Loosdrecht, 1995) por lo cual se requiere el proceso de lavado, como sistema de control del espesor de la película. Este aspecto es complejo y requiere ser sometido a estudios detallados, con el fin de establecer conclusiones apropiadas a las condiciones de operación en climas tropicales. Además se puede observar que los SSVLM (< 50 mg/l) se mantienen en proporciones despreciables en este sistema igual que en la etapa anterior.

- **Sistema de lodos activados:**

En la figura 63 se presenta el comportamiento de los sólidos durante esta etapa.

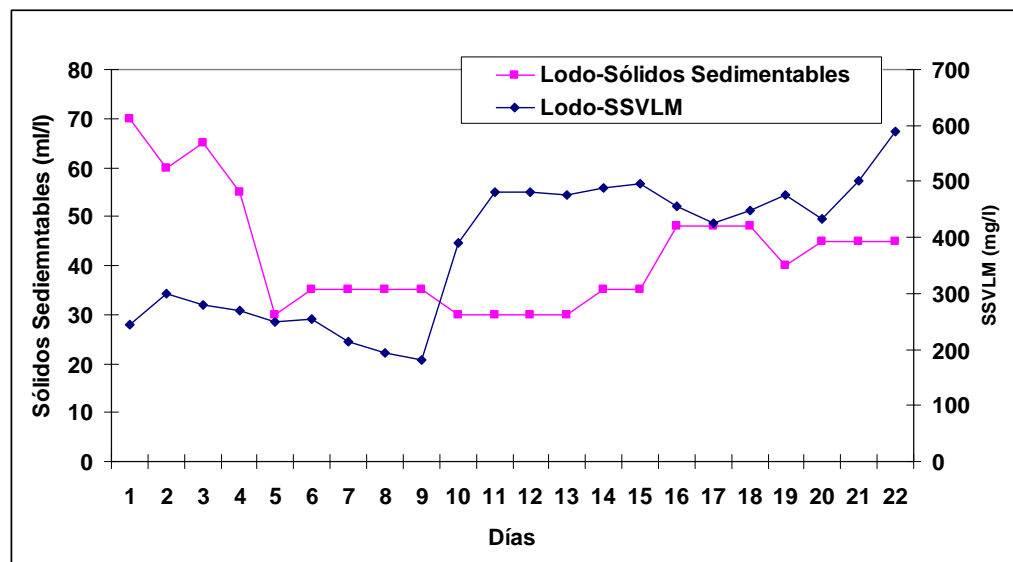


FIGURA 63.- Comportamiento de los sólidos durante la primera etapa en el sistema de lodos activados

En la figura 63 se aprecia que los sólidos sedimentables varían considerablemente desde un valor inicial 70 ml/l al inicio de esta etapa, hasta 40 ml/l al final de la etapa. Sin embargo los sólidos suspendidos volátiles se encuentran entre 200-600 mg/l, lo cual se encuentra por debajo del rango 500-1200 mg/l que recomiendan algunos autores para estos sistemas. (Eckenfelder,1970; Huang, J. et al, 1984) . Esto permite suponer que el sistema presenta problemas de pérdida de sólidos. Esta pérdida de sólidos se debe a que son arrastrados en el efluente, debido a inconvenientes relacionados con la operación, que coinciden con la formación de un floc liviano.

#### **5.3.3.4 Comparación entre la biopelícula y el lodo presente en los sistemas en esta etapa.**

A continuación se presentan en la figura 64 los dos sistemas en la segunda etapa. La imagen presenta un color diferente en el lodo, en relación a la etapa anterior, un color marrón más tenue. En cuanto al híbrido el líquido presenta color verde. Esto se debe a la presencia de algas, las cuales no permiten diferenciar el medio.



FIGURA 64.- Aspecto de los tanques durante está etapa

En la figura 65 se presenta la biopelícula, la cual tiene un aspecto que combina regiones verdes, con regiones marrones brillantes. No se observa el predominio de algas y las ramificaciones que se observan en la primera etapa. Esto puede significar

que las condiciones de operación, en esta etapa, desfavorecen considerablemente la proliferación de algas en el sistema.

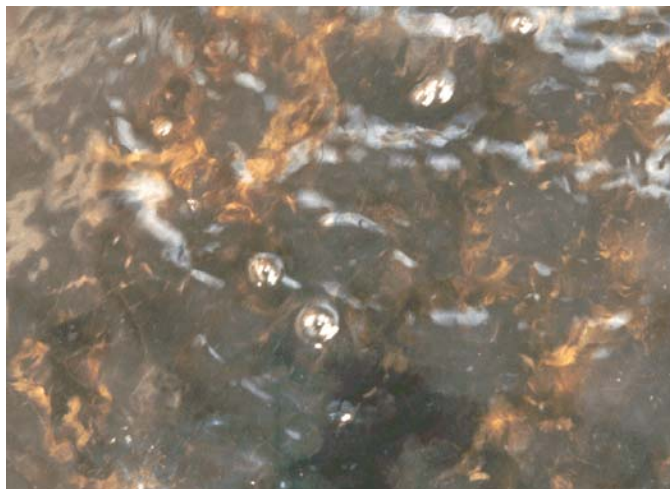


FIGURA 65.- Aspecto de la biopelícula durante la segunda etapa

Con respecto a las observaciones microbiológicas se puede señalar que el lodo presenta un flóculo bastante compacto, la diversidad biológica es similar a la presentada en la fase anterior. Es importante señalar que la mayor diversidad biológica se presenta en la fase de arranque. En esta segunda etapa se observa rizopodos y vorticellas, las cuales presentan un aspecto curioso, de ramillete, característico de la adecuada concentración de OD.

La diversidad de la biopelícula es superior, se observan algas filamentosas que sustentan el flóculo, abundancia de flagelados, rotíferos, aspidiscas, nemátodos. El flóculo es compacto y redondeado.

#### **5.3.3.5. Comparación de las eficiencias de remoción en los sistemas**

En esta sección se comparan las eficiencias de remoción de ambos sistemas, en relación primero a la DBO y luego a la DQO.

- **Resultados de la DBO:**

A continuación se comparan las eficiencias de remoción en relación a la DBO

TABLA 44.- Remoción de DBO en los sistemas durante segunda etapa

	Lodo			Híbrido	
Fecha	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente- lodo (mg/l)	REMOCIÓN (%)	DBO efluente híbrido (mg/l)	REMOCIÓN (%)
16-Mar	125	16	87	24	81
18-Mar	129	26	80	15	88
20-Mar	130	25	81	10	92
27-Mar	158	25	84	10	94
29-Mar	142	26	82	13	91

En la tabla 44 se presenta el rango de remoción de los sistemas evaluados. En los últimos valores de esta fase, es decir aquellos más próximos a la estabilidad, existe una eficiencia de remoción mayor en el híbrido que se encuentra entre 88-94 %, mientras que el sistema de lodos activados se encuentra, durante toda esta fase, entre 80-87 %. Es interesante señalar respecto a estos resultados, que el primer valor de eficiencia de remoción en el híbrido, se debe a la situación generada por el lavado de la biopelícula. Se debe recordar que al inicio de cada etapa se lava la biopelícula, para mantener las condiciones de operación.

#### Resultados de la DQO:

A continuación se presentan los resultados de la eficiencia de remoción en términos de DQO

TABLA 45.- Remoción de DQO en los sistemas durante segunda etapa

	Lodo			Híbrido	
Fecha	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente- lodo (mg/l)	REMOCIÓN (%)	DQO efluente híbrido (mg/l)	REMOCIÓN (%)
16-Mar	312	47	85	47	85
18-Mar	274	76	72	76	72
20-Mar	274	66	76	66	76
27-Mar	290	54	81	54	81
29-Mar	299	64	79	54	82



En la tabla 45 se aprecian los resultado de eficiencias en remoción las cuales son muy similares para los sistemas estudiados. La similitud de resultados en ambos sistemas puede atribuirse a que la sensibilidad del método no permite apreciar pequeñas diferencias.

### 5.3.3.6 Comparación de los sistemas en estado estacionario durante la segunda etapa evaluada: ( $\theta_h = 10$ h; $Q = 0,530$ l/min).

En esta fase la evaluación se realiza utilizando muestras compuestas. Se realizan tres muestreos los días 30, 31 de marzo y primero de abril.

#### 5.3.3.6.1 Parámetros fisicoquímicos

Durante la evaluación, en cada muestreo se realizan mediciones cada hora de los parámetros fisicoquímicos. Esta información se presenta a continuación en las tablas 46, 47 y 48.

Tabla 46.-Variación de los parámetros fisicoquímicos para el afluente de los sistemas empleados

Afluente					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (µS)
<b>Promedio</b>	7,5	1,3	27,0	213	633
<b>Máximo</b>	7,8	2,8	29,2	252	742
<b>Mínimo</b>	7,2	0,4	25,3	165	463

Tabla 47.-Variación de los parámetros fisicoquímicos para el sistema de lodos activados

Sistema de Lodos Activados					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (μS)
<b>Promedio</b>	7,6	1,4	24,5	210	617
<b>Máximo</b>	7,8	2,8	27,2	230	652
<b>Mínimo</b>	7,4	0,5	25,9	180	557

Tabla 48.-Variación de los parámetros fisicoquímicos durante la fase estable para el sistema híbrido.

Sistema de Híbrido					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (μS)
<b>Promedio</b>	7,7	3,2	25,2	213	633
<b>Máximo</b>	7,9	5,0	26,4	228	660
<b>Mínimo</b>	7,5	2,0	22,9	190	581

De la información que se presenta en las tablas 46, 47 y 48 se puede observar que los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro del rango esperado. El pH en el afluente es superior al registrado en la etapa anterior en el afluente, sin embargo los valores que presentan los sistemas no presentan diferencia. La información completa se encuentra en la sección de anexos.

### 5.3.3.6.2 Comparación de la calidad del efluente obtenido (Eficiencia de remoción)

A continuación se presentan en la tabla 49 y 50 la información relacionada con la eficiencia de funcionamiento de ambos sistemas, función de la DBO y la DQO

Tabla 49.- Resultados en la estabilidad en función de la DBO

TIPO DE MUESTRA	COMPUESTA				
Sistema	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente (mg/l)	SSLM (mg/L)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	93	11	81	45	88
Lodo	93	22	759	610	76
TIPO DE MUESTRA	INSTANTANEAS				
Sistema	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente (mg/l)	SSLM (mg/L)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	133	19	28	17	86
Lodo	133	22	814	660	83

Tabla 50.- Resultados en la estabilidad en función de la DQO

TIPO DE MUESTRA	COMPUESTA				
Sistema	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	195	44	81	45	73
Lodo	195	56	759	610	58
TIPO DE MUESTRA	INSTANTANEAS				
Sistema	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	200	44	81	45	71
Lodo	200	65	759	610	66

En las tablas 49 y 50 se presentan las eficiencias de remoción de las muestras compuestas e instantáneas, en función de la DBO y DQO, respectivamente. En el caso del sistema híbrido las variaciones no son significativas; lo cual se debe a que el momento de captar la muestra instantánea, no se encuentra influenciado por el desprendimiento de la biopelícula. En el caso del sistema de lodos activados, al contrario de lo presentado en la etapa anterior, presenta un comportamiento

ligeramente oscilatorio. Esto indica que la muestra instantánea se capta en un momento de funcionamiento por encima del promedio, y que su desempeño, en relación a los resultados de la primera etapa.

Con respecto a las relaciones DBO/DQO , la situación es similar a la que se presenta en la primera etapa.

Tabla 51.- Cargas aplicadas durante la primera etapa en función de la DBO

	<b>Híbrido</b>	<b>Lodo</b>
<b>Parámetro en función del cual se calcula la carga</b>	<b>Carga orgánica aplicada (g DBO/m<sup>2</sup>*d)</b>	<b>Carga orgánica aplicada (Kg DBO/Kg SSVLM*d)</b>
DBO	8,7	0,12

En la tabla 51 se observa que la carga orgánica aplicada es 8,7 g DBO/m<sup>2</sup>\*d, este valor se encuentra en el rango de carga de operación que recomienda el fabricante, para remoción de materia carbonácea exclusivamente. (8-12 g DBO/m<sup>2</sup>\*d)

En este sistema los autores refieren que permite obtener eficiencias mayores al 85 % y que mantiene la calidad del efluente, al ir aumentando la carga orgánica aplicada. Es importante mencionar que esto se cumple si se mantienen las condiciones de OD en el sistema.

En relación al sistema de lodos activados se puede mencionar, que la carga orgánica aplicada se encuentra dentro del rango recomendado para la modalidad convencional. Las eficiencias de esta modalidad se encuentra ente 75-85 %, por lo tanto el resultado coincide con lo esperado. <sup>(Metcalf and Eddy, 1991)</sup>. Se puede añadir que los SSVLM se mantienen, en relación a la primera etapa.

**5.3.3.6.2 Resultados obtenidos respecto a la conversión de nitrógeno amoniacal:**

Tabla 52.- Resultados en la estabilidad en relación a la conversión de nitrógeno amoniacal

	<b>NTK</b>	<b>NH3-N</b>	<b>NORG</b>	<b>NO2-N</b>	<b>NO3-N</b>	<b>NTOTAL-</b>
<b>Afluente</b>	22,33	16,69	6,13	0,24	0,09	22,83
<b>Híbrido</b>	20,93	16,13	4,80	INAP	0,06	20,93
<b>Lodo</b>	19,00	16,43	2,57	INAP	0,07	19,00

En la tabla 52 se aprecian las cantidades de nitritos, nitratos y las formas reducidas, nitrógeno amoniacal y orgánico. Respecto a esta información se puede señalar que existe una pequeña disminución, insignificante de las formas reducidas de nitrógeno. Por esta razón se puede afirmar que en la segunda etapa los sistemas no realizan nitrificación.

### 5.3.4.- Tercera Etapa: Alta Rata:

Esta etapa dura 24 días aproximadamente y se define su inicio cuando se establecen las condiciones de operación de esta etapa. A continuación se presentan las cinco secciones: parámetros fisicoquímicos, parámetros de operación, variación de los sólidos, comparación de la biomasa presente y comparación de las eficiencias.

#### 5.3.4.1 Parámetros fisicoquímicos

A continuación se presentan en las figuras 66, 67 y 68 la dinámica del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos.

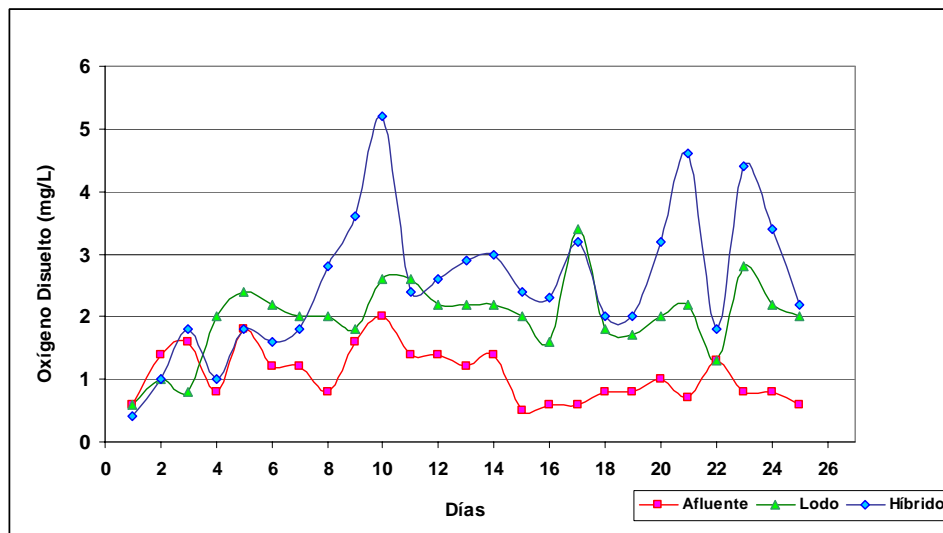


FIGURA 66.- Variación del OD durante la tercera etapa para los sistemas estudiados

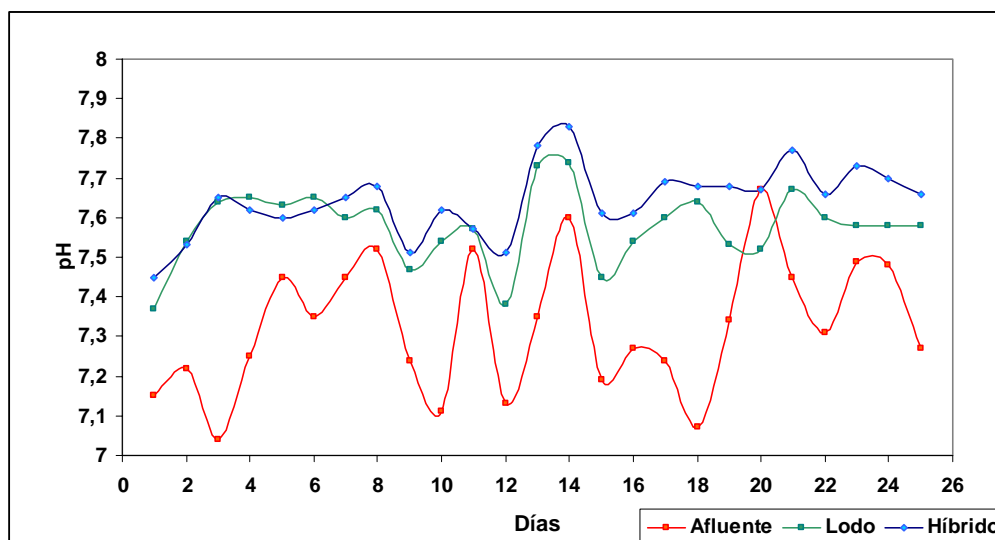


FIGURA 67.- Variación del pH durante la tercera etapa para los sistemas estudiados

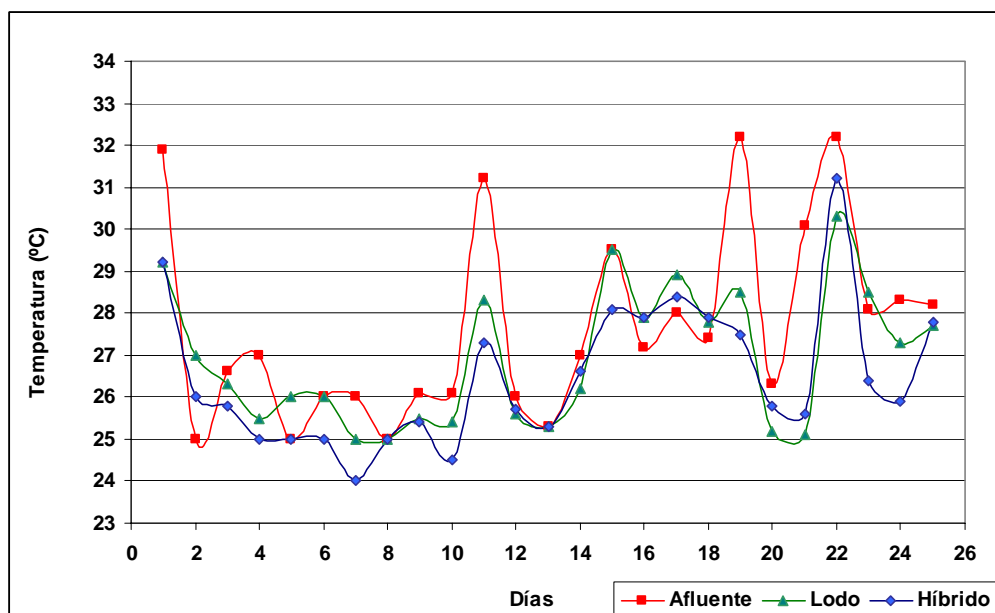


FIGURA 68.- Variación de la temperatura durante la primera etapa para los sistemas estudiados

En la figura 66 se observa que en esta etapa la concentración de OD en el sistema de lodos activados se encuentra entre 0,5 y 3 mg/l, con un promedio de 2 mg/l, por lo cual se puede afirmar que se mantiene en el rango esperado. En el sistema híbrido se presenta una situación diferente: debido al incremento de la

temperatura del afluente, lo cual implica un aumento de la temperatura de los sistemas, como se aprecia en la figura 65; lo cual produce que el OD disminuya bruscamente. Por este motivo se realiza un seguimiento especial a estos dos parámetros, para ajustar así el suministro de aire y mantener las condiciones de OD. En la figura 63 se observa que el OD, en el sistema híbrido luego de realizar el ajuste mencionado, se mantiene dentro del rango apropiado: entre 2 y 5 mg/l, con un promedio alrededor de 3. Por este motivo se puede afirmar que el OD tiene especial importancia en la operación de sistemas híbridos en climas tropicales donde las elevadas temperaturas afectan la cantidad de oxígeno disuelto y al incrementarse la demanda del mismo asociada al aumento de la carga orgánica, el sistema presenta problemas operacionales; que pueden traducirse en malos olores y/o disminución de la calidad del efluente. Actualmente, la comprensión de este fenómeno es limitada y se requieren estudios posteriores para establecer conclusiones definitivas. (Chang H; et al, 1993) En la figura 63 los sistemas presentan un rango de variaciones de pH similar al presentado en las dos etapas anteriores. Dicho parámetro presenta una variación muy pequeña.

Con respecto a la temperatura, se aprecia en la figura 69, que el rango se encuentra entre 25-32 °C en el afluente, lo cual influye en los sistemas significativamente, pues presentan un aumento considerable en el promedio de este parámetro. En esta etapa el rango se encuentra entre 25 y 31 °C, mientras que en la etapa anterior se encuentra entre 22 y 29 °C. Este incremento en la temperatura del agua como se menciona anteriormente, perjudica considerablemente las condiciones de los sistemas pues, como es lógico, el OD disminuye al aumentar la temperatura. En el caso del sistema de lodos activados el incremento parece incidir menos en su funcionamiento. Sin embargo, se debe recordar que el rango de operación de los sistemas híbridos, en trabajos similares, se encuentra entre 20-25 °C. (Lessel, 1994), por lo tanto se desconoce a ciencia cierta la interrelación entre estos dos parámetros en los sistemas híbridos y su influencia en la biopelícula.



### 5.3.4.2. Parámetros de operación en la tercera etapa:

En la tabla 53 se presenta el tiempo de retención hidráulico, las relaciones de reciclo y el tiempo de retención celular para ambos sistemas

Tabla 53.- Caudales de operación en los sistemas durante la segunda etapa

SISTEMA	Tiempo de Retención hidráulico (h)	Tiempo de Retención Celular (d)	Relaciones de reciclo
Híbrido	5	N.A.	65
Lodos Activados	5	10	70

N.A. = No Aplica

### 5.3.4. 3 Comportamiento de los sólidos en los sistemas

A continuación se presentan las características del comportamiento de los sólidos en cada sistema.

- **Sistema híbrido:**

A continuación en la figura 69 se presenta el comportamiento de los Sólidos Sedimentables y los SSVLM en el sistema híbrido.

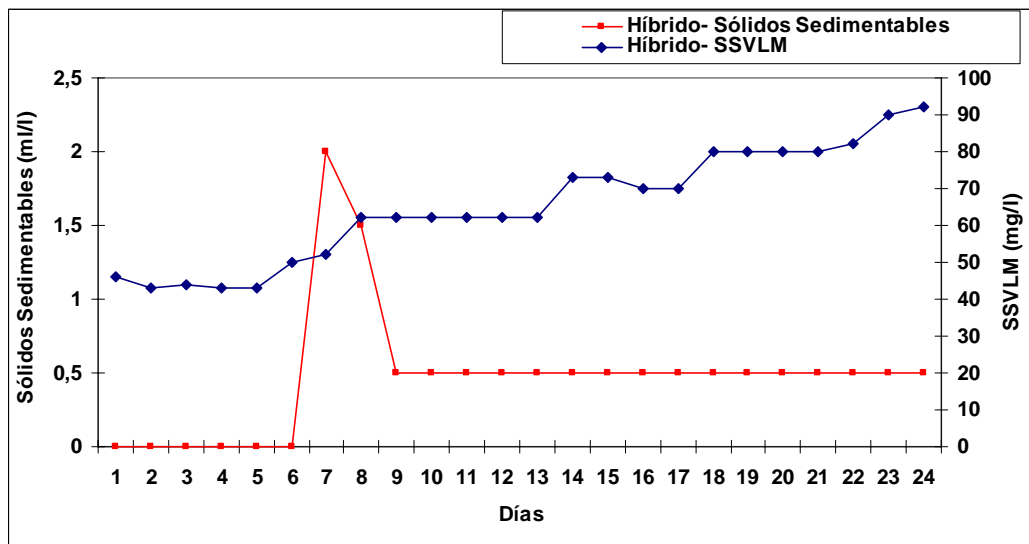


FIGURA 69.- Comportamiento de los sólidos durante la tercera etapa para el sistema híbrido

Es importante señalar que antes de iniciar esta etapa también se realiza el proceso de lavado de la biopelícula, como al finalizar la primera etapa. Esto con la finalidad de controlar el espesor, pues al aplicar mayor carga en el sistema la película tiende a aumentar, hasta alcanzar un grosor máximo de la capa aerobia. Sin embargo, si la película sigue aumentando sobre este espesor máximo, la tasa de remoción tiende a ser constante. En ese instante empieza el incremento de la capa anaerobia y la tasa de remoción empieza a disminuir. <sup>(Chuang, H. et al, 1993)</sup>

En la figura 69 se aprecia que los sólidos sedimentables permanecen constantes a lo largo en el tiempo. El máximo de 2 ml/l se presenta en uno de los ajustes de OD que se realiza, el cual desprende la película, por lo cual no indica ningún cambio real en el sistema.

Con respecto a los SSVLM se observa que aumentan, en relación con las dos etapas anteriores. La explicación razonable para este incremento se encuentra en el hecho de que cuando se aplica una carga orgánica mayor, que se traduce en una carga volumétrica mayor, existen fuerzas de erosión hidrodinámica sobre la biopelícula y esto favorece el crecimiento en suspensión. <sup>(Jácome, 2001a)</sup> Adicionalmente el incremento en el flujo de aire, para mantener el OD, implica un aumento en la turbulencia, lo cual tiende a favorecer la formación de la suspensión. <sup>(Müller, 1998)</sup>

- **Sistema de lodos activados:**

En la figura 70 se presenta el comportamiento de los sólidos durante la tercera etapa

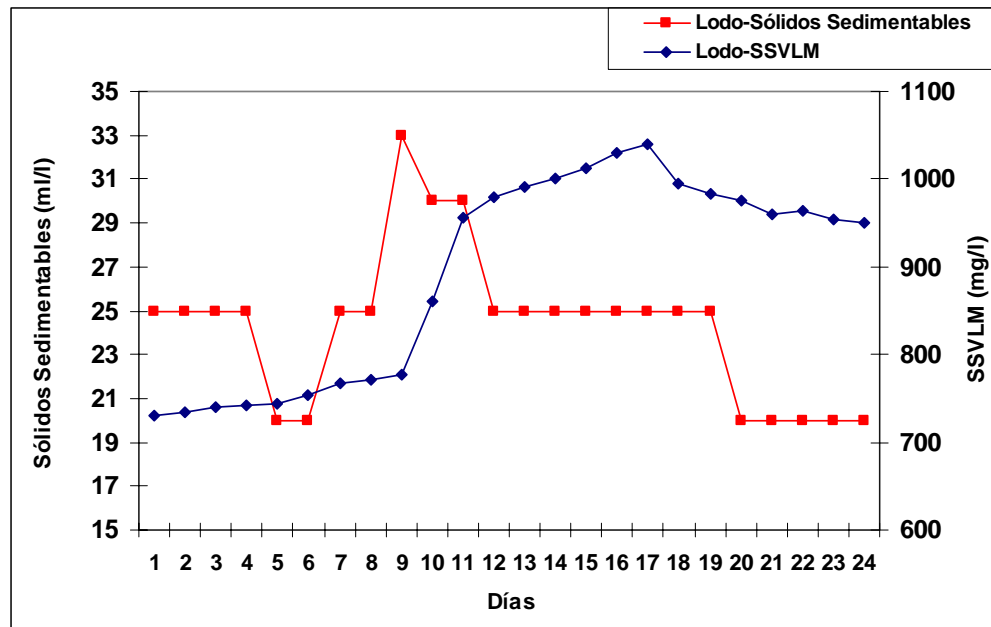


FIGURA 70.- Comportamiento de los sólidos durante la tercera etapa en el sistema de lodos activados

En la Figura 70 se aprecia que los sólidos sedimentables no varían considerablemente, se mantienen entre 20 y 30 ml/l durante esta etapa. Sin embargo los SSVLM aumentan con respecto a la etapa anterior, en la cual se encuentran entre 200-600 mg/l, para situarse entre 700-1040 mg/l. Esto coincide con lo esperado, pues al aplicar mayor carga orgánica al sistema de lodos activados, la fracción de suspensión volátil aumenta. La razón de esto es que los microorganismos disponen de mayor cantidad de sustrato por lo tanto crecen con mayor rapidez. Adicionalmente se puede mencionar que la baja cantidad de sólidos sedimentables se debe a la pérdida de los mismos. Esta pérdida de sólidos se debe a que son arrastrados en el efluente, como se aprecia en la figura 71.



FIGURA 71.- Aspecto de los sólidos en el efluente en el sistema de lodos activados

En la figura 71 se aprecia los sólidos sedimentables en el efluente el día cuatro de mayo de 2004. La cantidad es de 3 ml/l, lo cual explica que la proporción de sedimentables no aumente. Es interesante resaltar que esta pérdida no afecta significativamente la cantidad de SSVLM, la cual se mantiene entre 500-1200 mg/l; rango apropiado para lodos activados a escala piloto. <sup>(Cech, J et al, 1984)</sup>

#### **5.3.4.4 Comparación entre la biopelícula y el lodo presente en los sistemas en esta etapa.**

A continuación se presenta en la figura 72 los dos sistemas en la tercera etapa. La imagen presenta un color diferente en el lodo, en relación a la etapa anterior, un color verdoso. En cuanto al híbrido el líquido presenta color verde. El medio no se aprecia con claridad debido a la turbulencia generada por la aireación.



FIGURA 72: Aspecto de los tanques durante la tercera etapa

En la figura 73 se presentan la biopelícula, la cual combina un aspecto verdoso, con marrón claro. No se observa el predominio de las ramificaciones que se observan en la primera etapa. En la figura 70 también se observa la turbulencia, la cual no se percibe en las imágenes de las etapas anteriores.



FIGURA 73-. Aspecto de la biopelícula durante la tercera etapa

Por último es importante mencionar, que al final de la evaluación, se retira el medio de soporte y se descarga el tanque de aireación. En el fondo del mismo se encuentran depósitos de lodo anaerobio, de características similares al encontrado en el fondo del sedimentador secundario. Este sedimento es común en el medio empleado, tal como lo presentan algunos autores. <sup>(Lessel, 1994)</sup>

En relación con el lodo del sistema de lodos activados se puede señalar al realizar el ajuste de aire para mantener la concentración de OD, al inicio de esta tercera etapa, el flóculo presenta un aspecto más pequeño y disgregado. En comparación con la primera etapa se pueden apreciar diferencias en su aspecto. Probablemente debido a las dificultades para controlar este sistema operando bajo esta carga orgánica.

#### 5.3.4.5. Comparación de las eficiencias de remoción en los sistemas

En esta sección se comparan las eficiencias en relación primero a la DBO y luego a la DQO. Esto con la finalidad de apreciar el comportamiento de los sistemas antes de alcanzar la estabilidad.

- **Resultados de la DBO:**

A continuación los resultados en función de la DBO:

Tabla 54.- Remoción de la DBO en los sistemas estudiados durante esta etapa

		LODO		HÍBRIDO	
Fecha	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente (mg/l)	% Remoción	DBO efluente (mg/l)	% Remoción
16-Mar	168	62	63	39	77
20-Mar	124	37	70	25	80
22-Abr	215	54	75	29	87
26-Abr	162	49	70	29	82
28-Abr	176	45	74	33	81
30-Abr	158	55	65	40	75
03-May	169	51	70	40	76

En la tabla 54 se puede apreciar las eficiencia de remoción de los sistemas estudiados durante la fase previa a la estabilización de la tercera etapa. En la misma se aprecia que la eficiencia de remoción del sistema híbrido, no disminuye tan marcadamente en relación a la etapa anterior, como en el sistema de lodos activados. El rango de eficiencia se mantiene entre 75- 82%, con un promedio alrededor de 80 %. mientras que en la etapa anterior se mantiene entre 77-92 %. La diferencia es

menor al 10 %. Es interesante recordar que la principal razón de las fluctuaciones en la calidad del efluente, en el sistema híbrido, se debe al desprendimiento de la biopelícula, ya que esta evaluación se realiza con muestras instantáneas; las cuales coinciden en algunas oportunidades, con dichos desprendimientos. Es importante mencionar que la diferencia en la eficiencia de remoción de DBO se encuentra alrededor de 15 % a favor del sistema híbrido, para los resultados previos a la fase de estabilización. Para finalizar se puede mencionar que la concentración en DBO en el afluente aumenta en esta etapa, se encuentra entre 160-220 mg/l, mientras que en las etapas anteriores se encuentra entre 120-160 mg/l. Esto se debe sin duda a que esta etapa se evalúa al final de la época de sequía y las primeras lluvias esporádicas arrastran aquella materia orgánica que se encuentra fija en determinados lugares.

### Resultados de la DQO:

Tabla 55.- Remoción de la DQO en los sistemas estudiados durante esta etapa

	LODO			HÍBRIDO	
Fecha	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN	DQO efluente (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
16-Mar	168	88	71	79	74
20-Mar	124	61	77	52	81
22-Abr	215	70	84	70	84
26-Abr	162	113	68	113	68
28-Abr	176	113	68	79	78
30-Abr	158	79	73	61	79
03-May	169	110	73	113	72

En la tabla 55 se presentan las eficiencias de remoción de los sistemas en relación a la DQO. En este caso las eficiencias de remoción son similares, entre 70-80 %, con valores un tanto superiores para el híbrido en los primeros valores. La diferencia de remoción menor en este parámetro y con fluctuaciones bruscas se debe a que, en muestras puntuales, pueden existir compuestos más difíciles de degradar, que probablemente en otras oportunidades no están presentes, los cuales son arrastrados por las lluvias. Sin embargo, el sistema híbrido parece especialmente

susceptible a degradar, estos compuestos más difíciles, como se observa en la tabla 63, debido a la dinámica que tiene lugar dentro de la biopelícula. (Müller, 1998)

Para finalizar se puede decir que en la etapa previa a la estabilidad, para la presente modalidad, el sistema híbrido mantiene su dinámica de desempeño, mientras que el sistema de lodos activados no la mantiene, con respecto a la DBO. En relación a la DQO las eficiencias son similares.

#### 5.3.4.6 Comparación de los sistemas en estado estacionario durante la tercera etapa evaluada: ( $\theta_h = 5 \text{ h}$ ; $Q = 1,07 \text{ l/min}$ )

En esta fase la evaluación se realiza utilizando muestras compuestas. Se realizan tres muestreos los días 10, 11 y 12 de mayo.

##### 5.3.4.6.1 Parámetros fisicoquímicos

Durante la evaluación, en cada muestreo se realizan mediciones cada hora, durante 24 horas, de los parámetros fisicoquímicos. Esta información se presenta a continuación en las tablas

Tabla 56.-Variación de los parámetros fisicoquímicos para el afluente de los sistemas empleados

Afluente					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (mS)
<b>Promedio</b>	7,4	1,8	29,4	215	0,665
<b>Máximo</b>	7,9	3,2	34,2	250	0,762
<b>Mínimo</b>	7,2	1,0	24,5	180	0,515



Tabla 57.-Variación de los parámetros fisicoquímicos durante la fase estable para el sistema de lodos activados

Sistema de Lodos Activados					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (mS)
<b>Promedio</b>	7,6	2,1	26,7	215	0,647
<b>Máximo</b>	8,0	4,1	29,2	230	0,686
<b>Mínimo</b>	7,5	1,1	24,9	195	0,574

Tabla 58.-Variación de los parámetros fisicoquímicos durante la fase estable para el sistema híbrido.

Sistema de Híbrido					
Parámetros	pH	Oxígeno Disuelto (OD) (mg/l)	Temperatura (°C)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (µS)
<b>Promedio</b>	7,7	2,5	25,8	220	652
<b>Máximo</b>	7,9	4,5	29,5	235	716
<b>Mínimo</b>	7,5	1,1	24,6	190	568

De la información que se presenta en las tablas 56, 57 y 58 se puede observar que los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro del rango esperado. El único parámetro que presenta diferencia es la temperatura, la cual presenta un promedio de 2 ° mayor, con respecto a las etapas anteriores. Sin embargo, existe un pico máximo de 34 °C, lo cual significa un cambio significativo en las condiciones de operación de los sistemas, ya que esta situación incide en la concentración de OD, de manera más relevante en el sistema híbrido.

### 5.3.4.6.2 Comparación de la calidad del efluente obtenido (Eficiencia de remoción)

A continuación se presenta en la tabla 59 y 60 la información relacionada con la eficiencia de funcionamiento de ambos sistemas, función de la DBO y DQO, respectivamente.

Tabla 59.- Resultados en la estabilidad en función de la DBO

TIPO DE MUESTRA	COMPUESTA				
Sistema	DBO afluente (mg/l)	DBO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	107	28	121	74	74
Lodo	107	45	1136	853	58
TIPO DE MUESTRA	INSTANTANEAS				
Sistema	DBO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	157	50	121	74	68
Lodo	157	68	1136	853	56

Tabla 60.- Resultados en la estabilidad en función de la DQO

TIPO DE MUESTRA	COMPUESTA*				
Sistema	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	249	60	121	74	74
Lodo	249	77	1136	853	66
TIPO DE MUESTRA	INSTANTÁNEAS*				
Sistema	DQO afluente (mg/l)	DQO efluente (mg/l)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Híbrido	307	77	121	74	76
Lodo	307	86	1136	853	72

\*Promedio de los tres muestreos

En términos de los resultados de las muestras compuestas e instantáneas, los resultados son similares, debido a que el patrón presentado en las etapas anteriores se repite; tanto en la comparación entre las muestras como en relación a la DBO y DQO.

En la tabla 60 se observa que la eficiencia de remoción, en función de la DBO, es mayor para el sistema híbrido, un 16 %. Esta diferencia es superior a la que se presenta en la etapa anterior, lo cual implica que el sistema híbrido mantiene la eficiencia de remoción de DBO, mientras que en el sistema de lodos activados dicha eficiencia tiende a disminuir.

Tabla 61.- Cargas aplicadas durante la primera etapa en función de la DQO

	<b>Híbrido</b>	<b>Lodo</b>
<b>Parámetro en función del cual se calcula la carga</b>	<b>Carga orgánica aplicada (g DBO/m<sup>2</sup>*d)</b>	<b>Carga orgánica aplicada (Kg DBO/Kg SSVLM*d)</b>
DBO	18,4	0,20

Es importante señalar que, como se puede apreciar en la tabla 61, la carga orgánica aplicada al sistema híbrido es 18,4 g DBO/m<sup>2</sup>\*d, lo cual implica más del doble de la carga aplicada en la etapa anterior. Adicionalmente se encuentra muy por encima del rango de operación para este sistema, sin embargo su respuesta a dicho aumento es positivo. Esto coincide con lo esperado, pues el sistema híbrido tiende a mantener sus condiciones al aumentar la carga aplicada.

En relación al sistema de lodos activados se puede mencionar, que la carga orgánica aplicada se encuentra en el rango recomendado para esta modalidad. Por lo tanto, es lógico esperar una eficiencia más elevada que la obtenida en este caso. Se puede añadir que los SSVLM aumentan en relación a la segunda etapa, lo cual es

lógico, pues la carga en el afluente es alta, pero no se refleja; debido a al incremento, ya mencionado, en los SSVLM.

#### 5.3.4.6.2 Resultados obtenidos respecto a la conversión de nitrógeno amoniacal:

Tabla 62.- Resultados en la estabilidad en relación a la conversión de nitrógeno amoniacal

	- NTK	NH3-N	NORG	NO2-N	NO3-N	NTOTAL
<b>Afluente</b>	23,63	16,33	6,20	INAP	INAP	22,53
<b>Híbrido</b>	21,87	16,00	5,87	INAP	INAP	21,87
<b>Lodo</b>	20,10	16,30	3,70	INAP	INAP	20,10

En la tabla 62 se aprecia que en esta tercera etapa los sistemas no realizan nitrificación. Esto lo confirma el hecho de que no existe consumo de alcalinidad en los sistemas.

### 5.3.5. Relación de cargas aplicadas en función de las eficiencias para ambos sistemas:

- **Sistema Híbrido:**

A continuación se presentan en las figuras 74 y 75 la relación entre la carga orgánica aplicada (COA) y la eficiencia en remoción de materia orgánica, en términos de DBO y DQO, respectivamente, para el sistema híbrido.

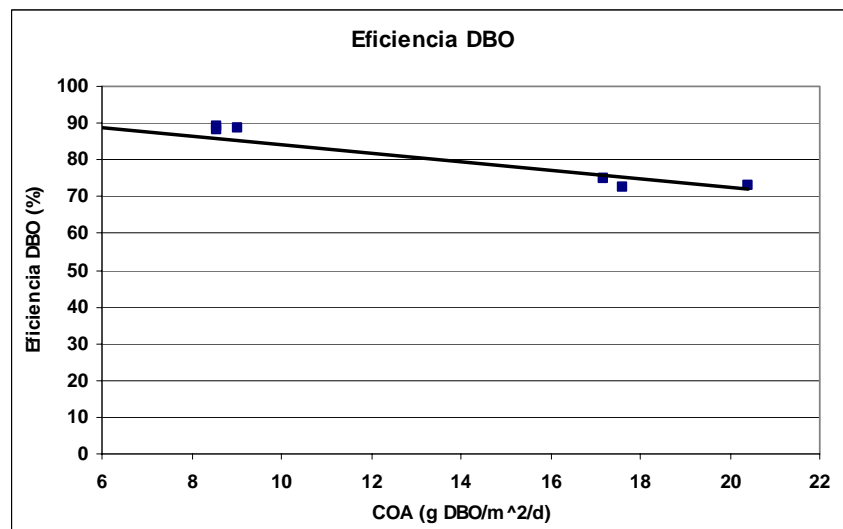


Figura 74. Eficiencia en función de la Carga Orgánica Aplicada en términos de (DBO) para el sistema híbrido

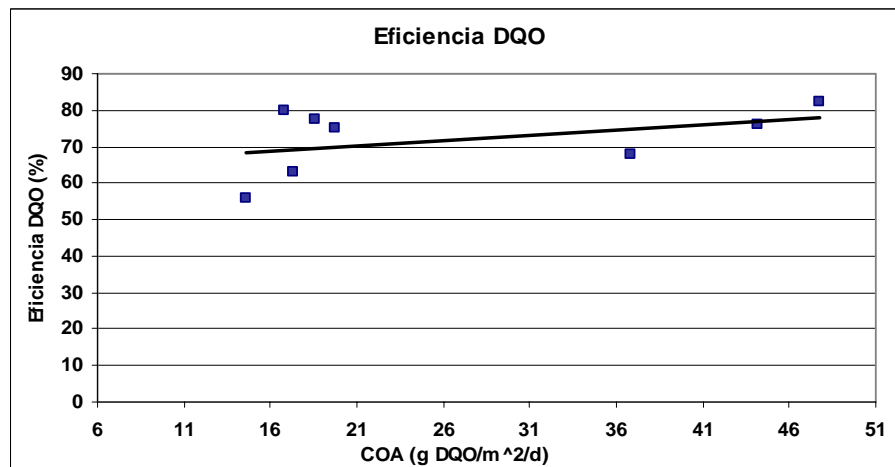


Figura 75. Eficiencia en función de la Carga Orgánica Aplicada en términos de (DQO) para el sistema híbrido

Se aprecia que el sistema híbrido tiende a mantener su comportamiento al aumentar la carga orgánica. La pendiente disminuye, en función de la DBO, pero no decae bruscamente. En el caso específico de la situación que se presenta en la figura 75, esto coincide con lo que refiere el fabricante (figura 3), donde el sistema presenta tendencia a mantener el desempeño al aumentar la carga orgánica. De hecho, en las condiciones evaluadas en este trabajo, la capacidad del sistema híbrido, en función de la DQO, tiende a mejorar al aumentar la carga, pues la pendiente es positiva.

El efecto observado de la carga orgánica sobre la eficiencia del proceso, también es consecuencia de trabajar en condiciones de baja carga orgánica aplicada. Por lo tanto, cabe esperar que un aumento continuo de la carga aplicada produzca, una vez alcanzado un cierto valor límite, una caída continua en la eficiencia de remoción del proceso. <sup>(Harremöes, 1978)</sup>

A continuación se presenta en las figuras 76 y 77 la relación entre la Carga Orgánica Aplicada y la Carga Orgánica Eliminada (COE) para el sistema híbrido, términos de DBO y DQO, respectivamente

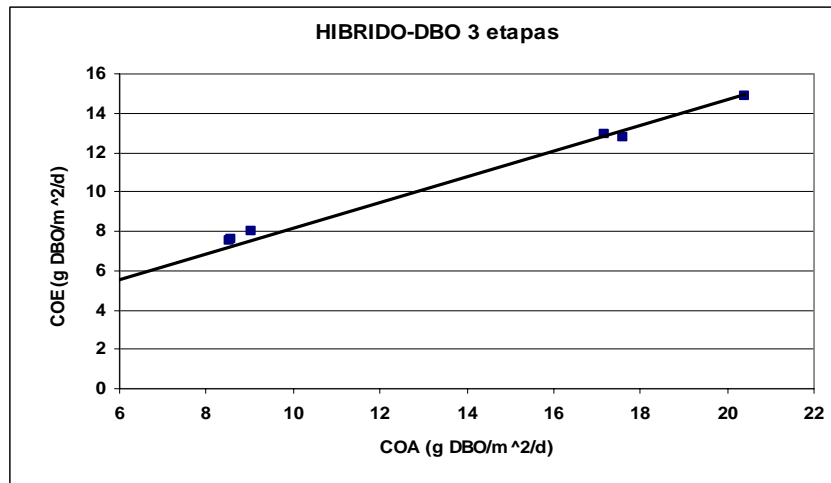


FIGURA 76: Comportamiento de la Carga Orgánica Aplicada en función de la Carga Orgánica Eliminada en términos de DBO

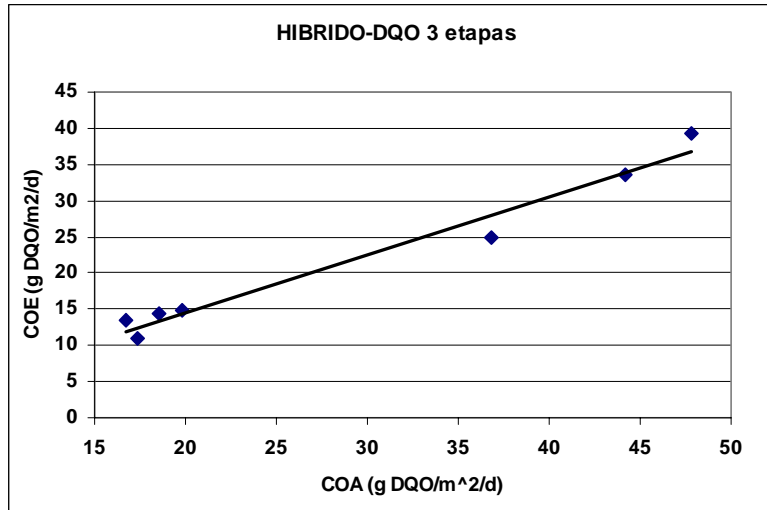


FIGURA 77: Comportamiento de la carga orgánica aplicada vs a la carga orgánica eliminada, en términos de DQO

Se aprecia que la relación entre la COA y la COE es lineal y de pendiente positiva. Esto implica que a mayor carga aplicada el sistema responde con un aumento en la tasa de remoción. Cabe resaltar, que la relación que se presenta es lineal porque corresponde a un proceso que opera en baja carga orgánica, como efectivamente, es el caso estudiado. Es de esperar que este comportamiento lineal llegue a un punto de saturación, es decir que a partir de un determinado valor de la carga aplicada, la carga eliminada alcance un valor constante, en la medida que el proceso opera en valores de alta carga. <sup>(Jácome, 2001a)</sup> Esto lo confirma el hecho de que la velocidad de remoción aumenta con la carga aplicada, dentro de la biopelícula, hasta alcanzar un valor límite después del cual cualquier carga adicional aplicada no se traduce en aumento en la remoción. <sup>(Rogalla, 1989)</sup>

Los resultados obtenidos implican un adecuado desempeño del sistema híbrido para las condiciones evaluadas, ratificando que tiende a mantener su comportamiento al aumentar la carga orgánica.

- **Sistema de Lodos Activados:**

A continuación se presenta el análisis análogo al anterior para el sistema de lodos activados:

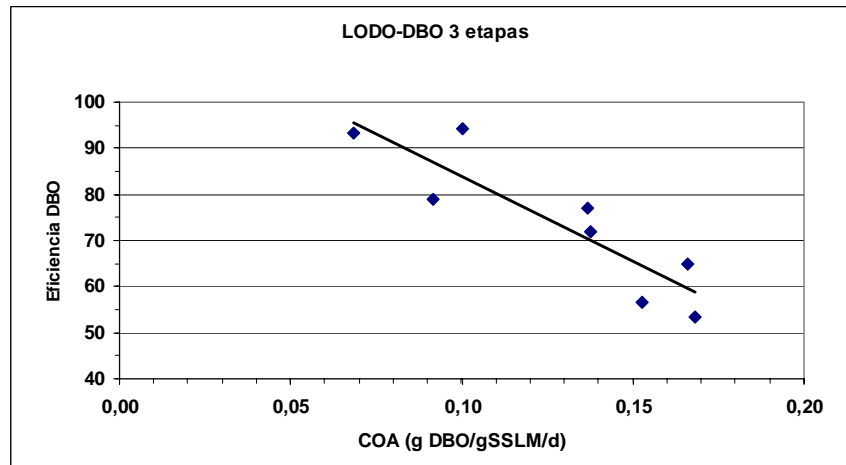


FIGURA 78.- Eficiencia de remoción en términos de DBO y la Carga Orgánica Aplicada para el sistema de lodos activados

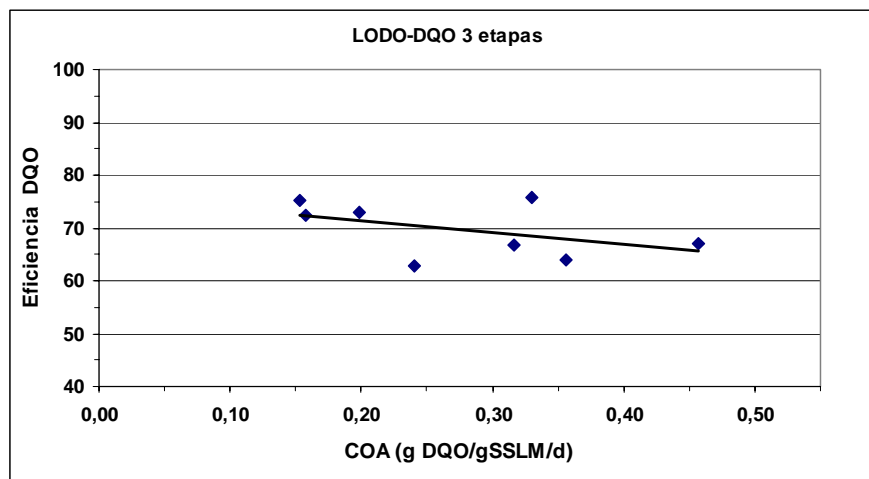


FIGURA 79.- Eficiencia de remoción en términos de DQO y la Carga Orgánica Aplicada para el sistema de lodos activados.

En la figura 78 y 79 se aprecia como el sistema de lodos activados pierde eficiencia al aumentar la carga orgánica, lo cual implica que su capacidad para soportar estos cambios disminuye. Esto coincide con lo esperado, pues esta es una característica típica de estos sistemas, por lo cual se desarrollan los sistemas híbridos, para intentar solucionar este problema <sup>(Metcalf and Eddy, 2003)</sup>

La figura 79 presenta que la pérdida de eficiencia en función de la DQO no es tan marcada como en el caso de la DBO. Por lo tanto se puede decir que ambos



sistemas tienden a mantener su comportamiento, en función de la DQO, al aumentar la carga. Por el contrario, existe una tendencia marcada por parte del sistema de lodos activados a no soportar cambios bruscos en la carga aplicada en función de la DBO. Esto es lógico pues los cambios en un reactor biológico afectan principalmente el metabolismo celular, es decir, el proceso de remoción de material biodegradable. Sin embargo, estos procesos tienden a mantener su capacidad de oxidación de material orgánico insoluble. (DQO) (Jacome, 2001a)

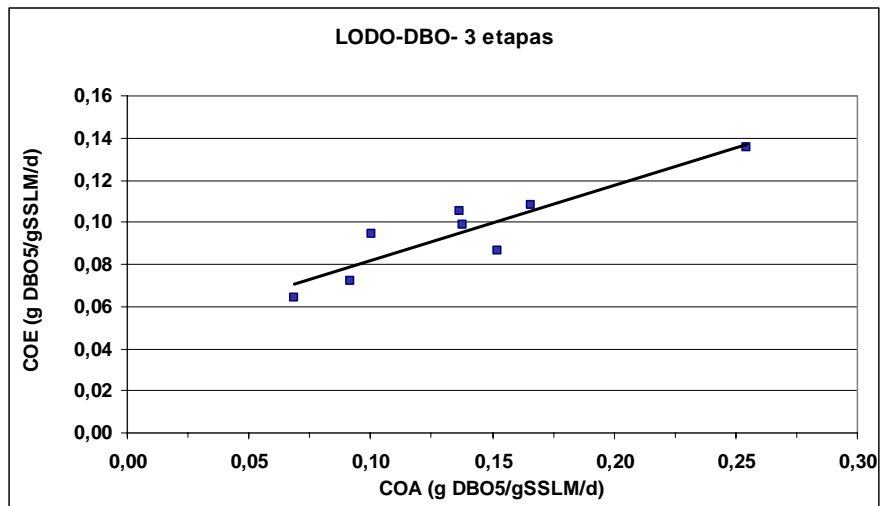


FIGURA 80.- Comportamiento de la carga orgánica aplicada vs a la carga orgánica eliminada, en términos de DQO

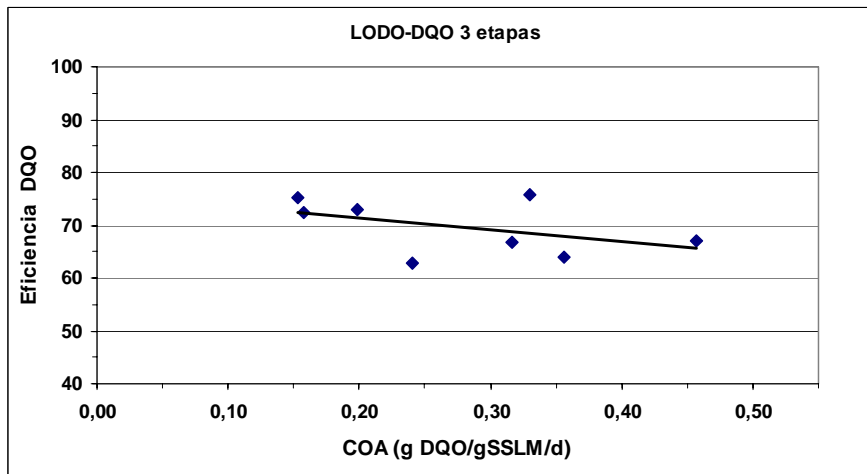


FIGURA 81.- Eficiencia de remoción en términos de DQO y la Carga Orgánica Aplicada para el sistema de lodos activados.

En la figura 80 y 81 se aprecia que la relación entre carga aplicada y eliminada también presenta tendencia lineal como en el caso del híbrido y por la misma razón: condiciones de operación de baja carga. En este caso se presenta una mayor dispersión, en relación al sistema híbrido, por lo tanto el comportamiento de este sistema tiende a presentar oscilaciones, con respecto a la COA, mostrando que su desempeño se ve afectado a medida que aumenta la carga orgánica.

Adicionalmente, se observa en la figura 81 que, de una manera menos notoria, el sistema de lodos activados tiende a perder eficiencia, mientras que por el contrario, el sistema híbrido tiende a mejorar su desempeño en las cargas más elevadas. El promedio en el porcentaje de remoción de la DQO es menor que el de a DBO. Esto puede ser motivado por el hecho de que existe presente material que no es susceptible a ser degradado biológicamente y el cual contribuye a la DQO y no a la DBO. Entonces, en la evaluación realizada, el sistema híbrido, no presenta ninguna desmejora significativa como resultado de aumentar la carga orgánica. (Sharek, et al, 2001)

El efecto de triplicar la carga hidráulica aplicada (de 0,1 Kg./m<sup>3</sup>\*d alrededor de 0,45 Kg./m<sup>3</sup>\*d.) es menor en la DQO que en la DBO.

Por último, la tasa de remoción del material biodegradable se ve afectada por los cambios en las condiciones de operación, no así el material oxidado químicamente.

### **5.3.6 Evaluación comparativa de los sistemas:**

La comparación por etapas tiene como finalidad señalar los aspectos más importantes que presentan ambos sistemas para realizar una comparación general apropiada.

#### **5.3.6.1. Comparación por Etapas:**

A continuación se presentan los aspectos más importantes que diferencian ambos sistemas durante la evaluación de todas las etapas:

- **Arranque:**

En el sistema híbrido la biomasa se forma más rápido, al séptimo día se observa una película delgada que cubre toda la extensión del medio. Sin embargo, no existe, hasta ahora, un parámetro directo para cuantificar esta situación. Esta situación se traduce en un cambio característico del agua, desde el punto de vista organoléptico (clarificación del agua, pérdida del mal olor) y del contenido de materia orgánica. (disminuye un 50 % de la materia orgánica en 4 horas y aproximadamente 92 % en 8 horas, aproximadamente.)

En el sistema de lodos activados la formación de biomasa es más lenta, se cuantifica utilizando los sólidos sedimentables y los SSVLM y la velocidad de formación de la biomasa es significativa mayor al emplear dos cargas, obteniendo valores de Sólidos Sedimentables de  $\approx 360$  ml/l y SSVLM  $\approx 1500$  mg/l, lo cual ocurre en aproximadamente 50 días. Lo antes señalado implica que el sistema híbrido requiere la mitad del tiempo de arranque para su operación en continuo, bajo las condiciones de alimentación a la cual fueron sometidos y considerando el efecto de las bajas cargas en el afluente evaluado. Con cargas mayores se reducen los tiempos de arranque de estos sistemas, tal como lo señalan algunos autores <sup>(Jácome, 2002)</sup>

- **Aireación Extendida:**

En esta etapa las eficiencias de remoción son similares, ligeramente superiores en el sistema de lodos activados, ya que debido a la baja carga del afluente, el sistema híbrido no logra desarrollar todo su potencial.

Aún cuando los resultados señalan que los parámetros captados de manera instantánea, o inclusive utilizando los resultados de las muestras compuestas no permiten cuantificar la cantidad de lodo generado por el sistema híbrido.

Sin embargo, por lógica, si se está aplicando la misma carga orgánica a ambos sistemas y el tiempo de residencia celular, en el sistema híbrido aunque es difícil determinarlo, es normalmente mayor se puede inferir que la producción de lodos en

este sistema debe ser menor que en el sistema de lodos activados. Asimismo, la biopelícula presenta una mayor mineralización, precisamente por lo anteriormente expuesto. Esto se evidencia, ya que la relación Sólidos Suspendedos Volátiles/Sólidos Suspendedos Totales en el híbrido es de  $\approx 60\%$ , mientras que en el sistema de lodos activados es  $\approx 80\%$ . adicionalmente la cadena trófica es mayor, de manera que existen incluso organismos depredadores, lo cual contribuye sustancialmente a una menor producción de sólidos

Estos dos aspectos pueden implicar una disminución considerable en los costos de manejo y disposición de los lodos en el sistema híbrido si se compara con el sistema de lodos activados. Aún más, puede darse la situación de que estos lodos del sistema híbrido sólo requieran ser secados para la disposición final.

Para ambos sistemas los requerimientos de OD se estiman mediante el uso de los cálculos cinéticos para un sistema de lodos activados y en esta etapa se logran satisfacer las necesidades de ambos sistemas, con dichas estimaciones.

- **Convencional:**

En esta etapa, debido a la mayor carga aplicada, la demanda de OD aumenta en el sistema híbrido, el cual requiere un incremento en el flujo de aire, para garantizar los niveles óptimos de operación de  $\approx 3$  mg/l. <sup>(Characklis, 1990)</sup> Esto se traduce en un incremento en los costos de aireación en el sistema híbrido, lo cual hace necesario un sistema de control del suministro de aire, tal como fue discutido en la sección 5.2.2.

En el caso particular del sistema híbrido, la demanda de OD se incrementa adicionalmente por incrementos en la temperatura. Esto se debe a que el oxígeno es un factor limitante en la velocidad de degradación del sustrato dentro de la biopelícula. De hecho, la transferencia de oxígeno del líquido a las capas internas de la misma, constituye la fase limitante del proceso de oxidación biológica, sensible a los cambios en estos parámetros. <sup>(Chuang et al, 1993)</sup> Por el contrario, el sistema de lodos

activados se ve afectado por cambios en la alimentación (Temperatura, OD y carga orgánica en el afluente)

En este caso, las eficiencias de remoción son superiores en el sistema híbrido, el cual mantiene su desempeño; mientras que el sistema de lodos activados tiende a disminuir. Adicionalmente el sistema híbrido tiende a alcanzar la estabilidad más rápido que el **sistema** de lodos activados. De hecho, el sistema híbrido responde rápidamente a los cambios en la alimentación, aumentando sus niveles de remoción. Los sólidos aumentan ligeramente en el sistema híbrido y en el sistema de lodos activados se mantiene la situación analizada en la etapa anterior.

En relación a la biomasa presente, en el sistema de lodos activados disminuye la diversidad biológica y el lodo pierde sedimentabilidad, en relación a la etapa anterior, pero mantiene su compactibilidad. El sistema híbrido, por el contrario, mantiene su diversidad biológica.

- **Alta Rata:**

En esta etapa se aplica el triple de carga orgánica, en relación a la primera etapa. El sistema híbrido maneja eficientemente esta situación; pues mantiene su eficiencia de remoción alrededor de 80 %, a diferencia del sistema de lodos activados, el cual presenta una tendencia a disminuir el desempeño, pues los niveles de remoción bajan alrededor de 15 %. Por lo tanto, el sistema híbrido es mucho más fácil de operar en estas condiciones que el sistema de lodos activados.

Sin embargo, el aumento de la carga orgánica se traduce, en el sistema híbrido, en un marcado aumento en los requerimientos de aire, lo cual se ve acentuado por el aumento de aproximadamente 2°C en el promedio de temperatura de los sistemas, con máximos de 31 °C, respecto a las etapas anteriores. Este incremento requiere de un ajuste frecuente del flujo de aire, para mantener el OD en condiciones óptimas. Sin embargo, este incremento no genera cambios significativos que señalar en el sistema de lodos activados.

El sistema de lodos activados presenta problemas operacionales como: pérdida de sólidos en el efluente (se observan 3 ml/l de sedimentables en el efluente, como se aprecia en la figura 71). Los sólidos sedimentan muy bien en la fase de arranque. Esta capacidad de sedimentación se hace más lenta de una etapa a la siguiente, a pesar de presentar una marcada tendencia a la compactación. Esto es relevante, pues los sólidos sedimentables disminuyen, pero los SSVLM permanecen dentro del rango apropiado para sistemas a escala piloto <sup>(Finamore, 1999; Cech, J; et al, 1984)</sup> Por el contrario, el sistema híbrido no presenta ningún problema de operación que mencionar, durante esta etapa.

Para finalizar se puede concluir que la posible razón para los problemas del sistema de lodos activados en esta etapa es que el tiempo de retención experimental se desvía un 36 % del tiempo de retención teórico, por lo tanto las partículas no permanecen en el sistema aproximadamente 5 h, sino un tiempo menor. Esta diferencia entre el tiempo teórico y experimental se hace especialmente importante en esta etapa, que presenta un tiempo de retención pequeño, ya que las partículas están dentro del sistema aproximadamente sólo 3 h. Por el contrario, el sistema híbrido, presenta un comportamiento con tendencia al flujo pistón, donde el tiempo de retención teórica y experimental prácticamente coinciden, razón que explica la eficiencia mayor en el mismo.

#### **5.3.6.2. Comparación del desempeño entre ambos sistemas en función de la Carga Volumétrica aplicada:**

A continuación se presenta la comparación entre ambos sistemas a través del único parámetro posible, por ser común a ambos sistemas, la carga volumétrica aplicada. Primero en función de la DBO y luego en función de la DQO.

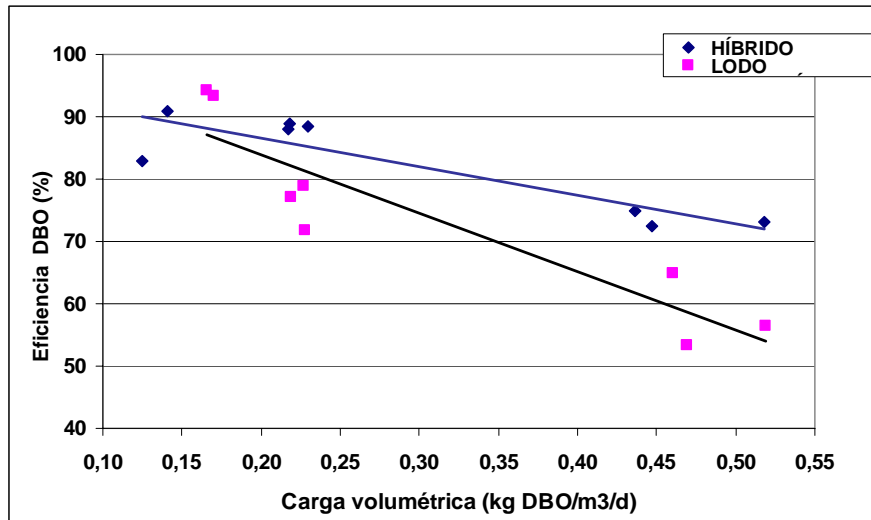


FIGURA 82.- Relación entre la eficiencia y la carga volumétrica apropiada en función de la DBO para ambos sistemas

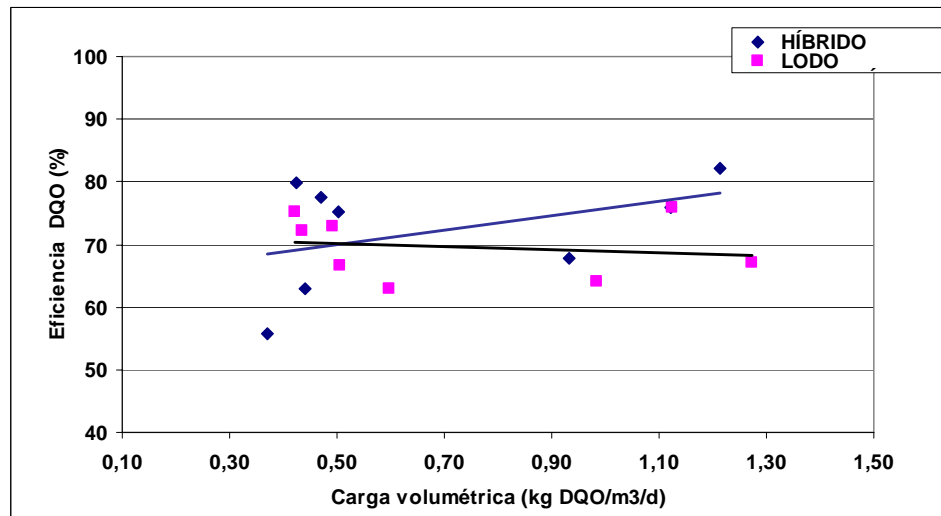


FIGURA 83.- Relación entre la eficiencia y la carga volumétrica apropiada en función de la DQO para ambos sistemas

En las figuras 82 y 83 se aprecia claramente que el sistema híbrido soporta mucho mejor, que el sistema de lodos activados, el aumento en la carga volumétrica situación que se evidencia en el comportamiento de ambas pendientes. Se puede apreciar que a medida que aumenta la carga volumétrica las eficiencias de remoción

de materia orgánica carbonácea, tienden a ser muy diferentes entre ambos sistemas. Esto coincide con lo esperado, pues el sistema híbrido presenta una pendiente de tendencia más horizontal, sobretodo cuando se opera a cargas elevadas. Esto parece indicar que la proporción de carga hidráulica aplicada no ha alcanzado, en este caso, aún el valor límite, por lo tanto, el sistema híbrido confirma su habilidad para manejar variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas, manteniendo su comportamiento.

El promedio en el porcentaje de remoción de la DQO es menor que el de a DBO. Esto puede ser motivado por el hecho de que existe presente material que no es susceptible de ser degradado biológicamente y el cual contribuye a la DQO y no a la DBO. Entonces, en la evaluación realizada, el sistema híbrido, no presenta ninguna desmejora significativa como resultado de aumentar la carga orgánica. (Sharek, et al, 2001) El efecto de triplicar la carga orgánica volumétrica aplicada (de 0,1 kg DBO/m<sup>3</sup>\*d a 0,3 kg DBO/m<sup>3</sup>\*d.) es menor en la DQO que en la DBO.

### **5.3.6.3. Influencia del Tiempo de retención hidráulico.**

El tiempo de retención hidráulico ( $\theta_h$ ) es otro factor interesante que analizar. Un tiempo de retención hidráulico ( $\theta_h$ ) de 5 h incide de manera perjudicial en el rendimiento del sistema de lodos activados. También, es notorio que hay una relación inversa entre este parámetro y carga orgánica eliminada en el híbrido, pues, a menor tiempo de retención hidráulico ( $\theta_h$ ) la carga orgánica eliminada, COE, (en g DBO/m<sup>2</sup>\*d) es mayor, como se aprecia claramente en la figura 84. La razón de esto radica en que a mayor carga orgánica aplicada al sistema, aumenta la velocidad de transferencia de sustrato (DBO ó DQO) y oxígeno hacia la biopelícula, lo cual incide favorablemente en la tasa de remoción del sustrato dentro de la misma. Esto coincide con lo que señalan algunos autores (Chang, H et al, 1993; Guang, H et al, 1997)



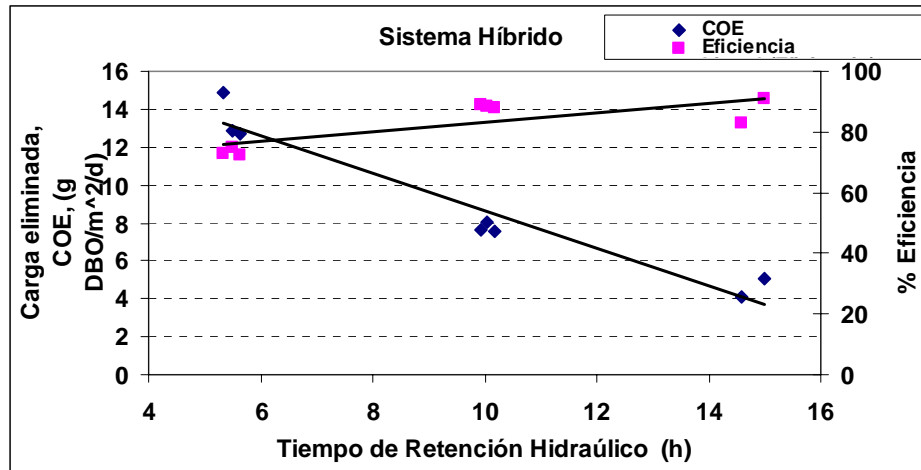


Figura 84.- Relación entre la carga eliminada, la eficiencia y el tiempo de retención hidráulico.

En relación a la eficiencia se observa que presenta la misma tendencia a aumentar que se observa en la figura 75. Es interesante señalar que al analizar la influencia del tiempo de retención hidráulica en la calidad del efluente, que se obtiene de los sistemas evaluados, se puede señalar que el sistema híbrido permite mantener la calidad del efluente, al disminuir el tiempo de retención hidráulico. Mientras que el sistema híbrido cumple, con amplio margen, lo establecido en el decreto 883, para el afluente evaluado, el sistema de lodos activados se encuentra en los valores límites, para un tiempo de retención de 5 h.

Adicionalmente se puede señalar que este sistema satisface incluso la normativa de la Unión Europea, específicamente la Directiva 91/271, que establece una  $DBO \leq 25 \text{ mg/l}$ , cuando se aplica una carga orgánica entre  $8\text{-}18 \text{ g DBO/ m}^2\cdot\text{d}$  y con una DBO promedio en la entrada de  $250 \text{ mg/l}$ . (Seoanez, 2002) En la figura 85 se puede apreciar que el híbrido cumple esta norma para un tiempo de retención de 5 h, mientras que el lodo activado necesita 10 horas. Por lo tanto, se puede decir que el sistema híbrido requiere la mitad del volumen que el sistema de lodos activados, operando en las mismas condiciones, para alcanzar una DBO de  $25 \text{ mg/l}$  en el efluente.

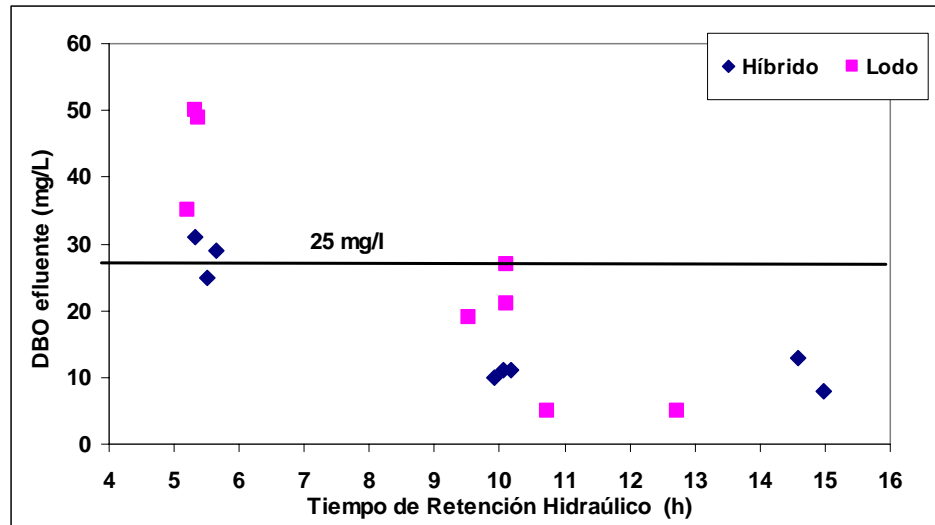


FIGURA 85.- Relación entre el tiempo de Retención Hidráulico y la DBO del efluente

#### 5.3.6.4. Funcionamiento de los sedimentadores

El funcionamiento de estas dos unidades en los sistemas evaluados es diferente, así como su mantenimiento. En el caso del sistema de lodos activados, para mantener la calidad del reciclo, se utiliza un sistema de barrelo, para evitar que se acumule el lodo en la pared del mismo y se descomponga. En el sistema híbrido se requiere retirar la biopelícula anaerobia, a través de la llave de purga, en la parte inferior del sedimentador. Es importante mencionar que el sistema de reciclo del sistema híbrido se obstruye con frecuencia, debido a los filamentos de biopelícula.

En cuanto a las relaciones de reciclo son diferentes en ambas unidades: en el lodo activado constituye un parámetro de diseño; en el sistema híbrido, por el contrario, no se conocen estas relaciones para cada modalidad. Por lo tanto, se aumenta la relación de reciclo en cada etapa, para intentar aumentar la concentración de SSVLM. Sin embargo, esta concentración permanece despreciable, con un ligero aumento, en la tercera etapa, donde oscila alrededor de 100 mg/l. Este valor es casi el doble de la cantidad presentada en las etapas previas. Sin embargo, no constituye una cantidad significativa. Esto confirma que en el sistema híbrido el reciclo no es necesario, pues no permite mejorar el funcionamiento del sistema. Además, los SSVLM depende en gran medida de la carga aplicada y no de la relación de reciclo

utilizada. Por lo tanto para lograr una suspensión significativa en los sistemas híbridos se debe operar a altas cargas. Algunos autores sugieren valores de aproximadamente 1500-3500 mg/l de DQO. De esta manera las fuerzas de erosión hidrodinámica, no permiten una adhesión tan significativa y los sistemas presentan un rango aproximado de 1-3 g/l de suspensión. <sup>(Rogalla, 1989)</sup> En este caso el sistema se opera como un sistema híbrido, pero se comporta como un lecho aireado sumergido, porque la cantidad de SSVLM es despreciable en el sistema durante toda la evaluación continua. Un lecho aireado sumergido presenta los mismos fundamentos del sistema híbrido, pero presenta baja proporción de SSVLM y se opera sin realizar reciclo de lodo de nuevo al sistema. <sup>(Jácome, 2001)</sup>

#### **5.3.6.5. Diferencias en la aplicación de los parámetros de control:**

Es importante señalar que los parámetros de control de operación de los sistemas no son iguales. En el caso del sistema de lodos activados, se utiliza el tiempo de retención celular, los SSVLM, los Sólidos Suspendedos y la relación de reciclo, como parámetros principales. En el caso del sistema híbrido estos parámetros no se pueden determinar con facilidad, pues no se conoce la biomasa total, valor indispensable para calcular tanto el tiempo de retención celular, como los Sólidos Suspendedos totales. En el caso de la relación de reciclo se evidencia que no es necesaria para nuestras condiciones operacionales.

Bajo esta perspectiva pareciera más sencillo operar un sistema híbrido que el sistema de lodos activados, sin dejar de lado la importancia del OD como parámetro significativo, para el buen desempeño del sistema híbrido.

Ante este planteamiento no hay duda de la importancia de definir parámetros de diseño apropiados para nuestras condiciones tropicales y para el líquido residual evaluado.

# Capítulo 6

## Conclusiones y Recomendaciones

## CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo:

- ⇒ Los parámetros de diseño empleados en este trabajo, así como la metodología utilizada para la construcción de los sistemas, el ajuste y puesta en marcha de los mismos, permiten realizar una comparación de tal forma que se logran los objetivos trazados.
- ⇒ Los sistemas presentan un comportamiento hidráulico que permite obtener resultados satisfactorios en su operación. El sistema híbrido tiende a modelo flujo pistón, donde el tiempo de retención hidráulico experimental prácticamente coincide con el teórico; (3% de diferencia) mientras que el sistema de lodos activados tiende al modelo mezcla completa, con una desviación de 36% para el tiempo de retención hidráulico.
- ⇒ La modalidad de operación más eficiente para el sistema de lodos activados es la aereación extendida. Por el contrario, el sistema híbrido funciona mejor en la modalidad alta rata.
- ⇒ El período de arranque para el sistema híbrido es la mitad del tiempo requerido para un sistema de lodos activados tradicional (tres semanas el sistema híbrido y casi 50 días el sistema de lodos activados).
- ⇒ El sistema híbrido constituye una alternativa viable para solucionar problemas de sobrecarga en sistemas de lodos activados tradicionales y además es apropiado para aplicaciones donde se requiera un elevado desempeño mediante unidades compactas.
- ⇒ Para las condiciones evaluadas en este trabajo el sistema híbrido permite obtener eficiencias de remoción en material carbonáceo  $DBO_{5,20}$  en el orden de 80 %.

- ⇒ El parámetro de control más importante para el sistema híbrido es el Oxígeno Disuelto (para oxígeno residual entre 2 y 4 mg/l) el cual debe ser considerado con especial cuidado para lograr resultados satisfactorios. En el caso del sistema de lodos activados el parámetro más importante es la carga orgánica aplicada.
- ⇒ El sistema híbrido mantiene su comportamiento al aumentar la carga, pues permite lograr eficiencias de remoción en función de la  $DBO_{5,20}$  en un rango alrededor de 80 %, por el contrario que el sistema de lodos activados, el cual disminuye su eficiencia un promedio de 15%, en relación a la modalidad convencional (TRH= 10 h), al operar con un tiempo de retención de 5 h.
- ⇒ Para una carga volumétrica de aproximadamente  $0,3 \text{ g DBO/m}^3\cdot\text{d}$  y un Tiempo de Retención Hidráulico de 5 h, el sistema híbrido permite obtener un efluente altamente estabilizado ( $DBO \leq 25 \text{ mg/l}$ ), mientras que el sistema de lodos activados presenta un efluente con una concentración alrededor de 60 mg/l.
- ⇒ El sistema híbrido permite obtener un efluente que cumple tanto con el Decreto 883 Gaceta Oficial N°5021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1.995 ( $DBO_{5,20} = 60 \text{ mg/l}$ ) a nivel nacional, como con la Directiva de la Unión Europea vigente, Decreto 91/271, operando en igualdad de condiciones que un sistema de lodos activados, con la mitad del volumen.
- ⇒ En el presente trabajo no se logra una concentración importante de SSVLM en el sistema híbrido, (máximo  $\approx 100 \text{ mg/l}$ ) ni de Sólidos Sedimentables (máximo  $\approx 7 \text{ ml/l}$ ), por lo tanto este funciona como un lecho aireado sumergido.
- ⇒ El sedimentador secundario del sistema híbrido debe ser diseñado con un dispositivo adicional para purgar inter-diariamente la biopelícula que se descompone de forma anaerobia, la cual afecta negativamente el desempeño del sistema.

- ⇒ Para las cargas evaluadas 0,08- 0,2 Kg DBO/ Kg SSVLM\*d para el sistema de lodos activados y 6,8-18,4 g DBO / m<sup>2</sup>\*d para el sistema híbrido, los sistemas no nitrifican significativamente.
  
- ⇒ El sistema híbrido demuestra elevada capacidad de manejar altas cargas, pues mantiene su desempeño estable en el tiempo. El sistema de lodos activados, por el contrario, no logra mantener su comportamiento, al aumentar la carga orgánica aplicada.

## RECOMENDACIONES.

A continuación se presentan las recomendaciones de este trabajo de investigación:

- ⇒ Evaluar un dispositivo de aireación tal que permita suministrar la cantidad de aire necesario, para mantener el oxígeno disuelto en el sistema híbrido, (para oxígeno residual entre 2 y 4 mg/l) pues este es el parámetro más importante en este sistema.
- ⇒ Realizar estudios sobre las propiedades de la biopelícula, tales como espesor, densidad, porcentaje de humedad para diferentes cargas, a fin de comprender un poco más, los fenómenos que ocurren en ella.
- ⇒ Instalar bombas dosificadoras, en los sistemas a evaluar, a fin de lograr un caudal más estable.
- ⇒ Disponer de unidades de repuesto en la operación de los sistemas, para lograr disponer de reemplazos en el caso de dañarse algún equipo importante (compresores, bombas, etc).
- ⇒ Realizar observaciones microscópicas de la biomasa presente al inicio y final de las etapas a evaluar, con la finalidad de detectar con tiempo problemas de operación en los sistemas e identificar importantes diferencias en los microorganismos presentes en el sistema en cada fase evaluada.
- ⇒ Realizar un seguimiento de los SSVLM durante la fase de arranque de los sistemas de lodos activados, en diferentes condiciones de carga orgánica, para verificar la relación que presentan con los sólidos sedimentables, a fin de establecer estos últimos como parámetro de control.



- ⇒ Evaluar la influencia del reciclo en el sistema híbrido y el efecto de la recirculación de la película en el proceso de nitrificación., para el mismo sistema.
  
- ⇒ Estudiar el comportamiento del sistema híbrido a los cambios de OD.
  
- ⇒ Instalar un rotámetro o similar en el compresor empleado a fin de poder manejar, eficientemente, caudales pequeños de aire.

# Capítulo 7

## Bibliografía

## BIBLIOGRAFÍA.

- APHA; AWWA; WEF **“Standard Methods for the Examination of water and wastewater”** Washington D.C. , (2000)
- Bio-Clear Ireland Ltd. **“Submerged films-Extended aeration systems.”**:<http://www.innovative-water-solutions.com/product2.html/> (2002).
- BISHOP, P. et al. **“Modeling heterogeneity in biofilms: report of the discussion session”**. Water Science and Technology Vol. 32, No.8, (1995). pp. 263-265.
- BLANCO, H. **“Sistema de Lodos Activados a escala laboratorio. Su aplicación en la determinación de constantes cinéticas”**. Tesis en Maestría en ingeniería sanitaria. Facultad de Ingeniería- Universidad Central de Venezuela. Marzo, (1997)
- BONHOMME, M. **“Enhancing nitrogen removal in activated sludge with fixed biomass”**. Water Science and Technology Vol. 22 N° ½. (1990) pp 280-292.
- CARRAND, G AND CAPON, A. **“Elimination of carbonaceous and nitrogenous pollutants by twin-stage fixed growth process”**. Water Science and Technology Vol. 22 N° ½. (1990) pp 261-272
- CARRILLO, G. y MARCIAL, L. **“Análisis de agua y líquidos residuales”**. Editorial Innovación Tecnológica. Facultad de Ingeniería. U.C.V. (1998)
- CARRION, B. **“Manual IV: EVALUACION: Análisis de flujos y factores que determinan los períodos de retención”**. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) Cali Colombia (1992).

- CASTOREÑA, F. **“Tratamiento de aguas residuales mediante un Sistema de Lodos activados. Departamento de Sistemas biológicos. UAM-X”** Universidad de Buenos Aires:  
<http://www.lodosactivados.com/art/rec.html> (2001)
- CECH, J et al. **“Determination of kinetics constants of activated sludge microorganisms”**. Water Science and Technology Vol. 17 Printed in Great Britain (1984) pp 259-272.
- CHANG, H et al. **“Relationship between the flux of oxygen and performance of biofilm”**. Water Science and Technology Vol. 18 N° 7 (1993) pp 153-158.
- CHARACKKLIS, W. **“Biofilms”** John Wiley & Sons, Inv ISBN 0-47182663-4. (1990) pp 796.
- CHUANG, H et al. **“Relationship between oxygen flux and biofilm performance”**. Water Science and Technology Vol. 28, No.7, (1993). pp.153-158
- CLEAN AND WATER BIOTEQ. **“BioTeQ Compact Submerged Fixed-Film Reactor Domestic and Industrial Waste Water Treatment.”**: [http://www.acenz.com/fixed-film\\_reactor/index.htm](http://www.acenz.com/fixed-film_reactor/index.htm) (2002).
- CRINE, M. et al **“Evaluation of the performances of random plastic media in aerobic trickling filters”**. Water Science and Technology Vol. 22 N° ½. (1990) pp 227-238.
- CRITES R. **“Sistemas de Manejo de Aguas Residuales Para Núcleos Pequeños y Descentralizados”**. Tomo II. Mc Graw Hill. Colombia, (2000)
- DICKENSON, D.; TOSHIKI YOSHIMURA C. **“Compact biofilm Reactor Aerobic wastewater treatment”**. Publicaciones Lantec. Tokio Japón. (2000)

- DILLON, M. **“A pilot scale evaluation of the biocarbene process for treatment secondary and nitrification”**. Water Science and Technology Vol. 22 N° ½. (1990) pp 190-198.
- EBERHARDT, H. **“Leistungsteigerung einer überlasteten Belenbungsanlage durch Einbau Submerser Festkörper.”** Wasserwirtschaft, Vol. 74. (1984) pp 47-53.
- ECKENFELDER W, **“Water Pollution control: Experimental procedures for proves design.”** Jenkins Book Publishing Co. Austin and New York. Pp 269. (1970).
- EIKELBOOM, D. **“Process Control of Activated Sludge Plants by Microscopic Investigation”**. IWA publishing London, Inglaterra. (2000)
- FERNANDEZ, E. **“Constantes cinéticas para un sistema de lodos activados a escala piloto”** Tesis Especial de Grado en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería-Universidad Central de Venezuela. (1999)
- FINAMORE, C. **“Constantes cinéticas en un sistema de lodos activados a escala de laboratorio”** Tesis Especial de Grado en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería- Universidad Central de Venezuela. (1999)
- GERARDI, M. **“Settleability Problems and Loss of Solids in the Activated Sludge Process”** (Water Microbiology Series). New Jersey (U.S.A.) (2002) Willey Interscience Publication. (Environmental Protection Magazine Series) (John Willey and sons).
- GONZÁLEZ, M. and DUQUE, L. **“Aerobic submerged biofilm reactors for wastewater treatment.”** Water Reseach. Vol. 26 number 6 (1992)
- GUANG H. C. et al. **“Removal of rate-limiting organic substances in a hybrid biological reactor.”** Water Science and Technology Vol. 35 NO. 6 pp 81-89 (1997)

- GRUBER, Y. et al. **“Start-up and running of the Song biological wastewater treatment plant.”** Water Science and Technology Vol. 20 N<sup>o</sup>. 4/5 pp 90-95 (1988)
- HAMODA, M et al. **“Operating characteristics of aerated submerged fixed-film (ASFF) bioreactors.”** Water Research. Vol. 21 No. 8 (1987)
- HAO CHEN, G. et al **“Removal of rate-limiting organic substances in a hybrid biological reactor.”** Water Science Technology, Vol. 35 N<sup>o</sup> 6, (1997).
- HARREMÖES, P. **“Biofilm kinetics”**. En Water Pollution Microbiology, R. Mitchell (ed) Vol. 2, New York, pp 71-110.
- HUANG, J et al **“Measurement and new applications of oxygen uptake rates in activated sludge processes.”** Water Pollution Control Federation, Vol. 56 N<sup>o</sup> 3, (1984)
- HYDROXYL SYSTEMS INC. **“Fluidized Fixed Film Reactor (F<sub>3</sub>R)”**: [http://www.hydroxyl.com/ww\\_02.htm](http://www.hydroxyl.com/ww_02.htm)
- IIDA, Y. et al **“Performance analysis of the aeration tanks in the activated sludge system.”** Water Science Technology, Vol. 20 N<sup>o</sup> 4/5, (1988). Pp-109-120.
- IWAI, S. KITAO, T. **“Wastewater Treatment with microbial films; wastewater with microbial films 1<sup>o</sup>Edi.”** Technomic Publishing Company, U.S.A. (1994).
- JÁCOME, A. **“Evaluación Preliminar de un sistema de biopelícula de lecho sumergido”** Tesis Magíster. Universidad de Cantabria. Santander España (2001a).
- JÁCOME A. Y SUÁREZ J. **“Apuntes de la asignatura: Ingeniería del Saneamiento Urbano. Evaluación Preliminar de un sistema de biopelícula de lecho sumergido ”**. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña. España. (2002)

- JÁCOME, A. “ **Apuntes de la asignatura: Ingeniería del Saneamiento Urbano Teoría y aplicaciones de Biofiltros** ”. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad da Coruña. Galicia. España (2001b).
- JUN FAN, X. “ **Nitrification and Mass Balance with bioreactor for municipal wastewater treatment** ”. Water Science and Technology. Vol. 34 Number 1/2 (1996) pp 129-136.
- LAZAROVA. V. “ **Integrated approach for biofilm characterization and biomass activity control.**” Water Research Vol. 29. N°7 (1994) pp 345-354.
- LESSEL, T. H. Y “ **Erfahrungen mit getauchten Festbettreaktoren für die Nitrifikation**“ Korrespondenz Abwasser. Vol. 38 (1991) pp 1652-1665.
- LESSEL, T. H. Y “ **Upgrading and nitrification by submerged bio-film reactor experiences from a large scale plant**”. Water Science and Technology. Vol 29 Number 10-11 (1994) pp 167-174.
- LOOSDRECHT, et al “ **Biofilms structures**”. Water Science and Technology. Vol 32 Number 8 (1995) pp 36-42.
- MÁCIA, M. “ **Estudio de la microfauna presente en un sistema de lodos activados a escala piloto**”. Tesis en Maestría en ingeniería sanitaria. Facultad de Ingeniería-Universidad Central de Venezuela. (1996).
- METCALF & EDDY. “ **Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales**”. Tercera Edición New York. (1991).
- METCALF & EDDY. “ **Wastewater engineering Treatment and Reuse**” Fourth Edition New York Editorial McGraw-Hill -(2003)
- MICROBAC, Ltd “ **MBR BIOREACTOR. MBR diffused aeration-mixing system**”: [http://www.btinternet.com/microbac/mbr\\_bioreactor.htm](http://www.btinternet.com/microbac/mbr_bioreactor.htm) (2002)

- MÜLLER, N. **“Implementing biofilm carriers into activated process - 15 years of experience”**. Water Science Technology. Vol 37. Nº 9 (1998) pp 167-174.
- NINASSI, M. D. et al **“Pre-denitrification of municipal wastewater: the interest of up-flow biofiltration”** Proceedings of the 70<sup>th</sup> Annual water Environment Federation Conference and Exposition October (1998)
- NSW-UMWELTTECHNIK. **“Bionet como medio de soporte”** Alemania (2001)
- ORR, P, Y LAWTY, R **“Operating experience with large random packed biofilm reactors”** Water Science Technology. Vol 22, Nº ½ (1990) pp 203-214.
- PEREZ, S. ; MENDEZ, C. **“Determinación y evaluación de Constantes cinéticas en sistemas de lodos activados a escala piloto y laboratorio y su aplicación en el diseño a escala industrial”** Trabajo Especial de Grado. Planta Experimental de Tratamiento de Aguas. Universidad Central de Venezuela. (2001)
- RINCONES, M. **“Sistema de Lodos Activados a Escala Laboratorio para el tratamiento de Efluentes Líquidos industriales de una empresa papelera.”** Trabajo de Ascenso. Facultad de Ingeniería- Universidad Central de Venezuela. (1995)
- ROGALLA, F . BACQUET, G. BONMOMME, M **“Fixed Biomass carriers in activated stredge plant”** WET, Vol 21 (1989) pp 1643-1646.
- ROMERO ROJAS, J. **“Tratamiento de aguas residuales. Teoría y Principios de Diseño”**. Escuela Colombia de Ingeniería grupo editor (1999).
- RUSTEN, B; McCOY R;. et al **“The innovative moving bed biofilm reactors/solids contact reaeration process for secondary treatment of municipal wastewater”** Water Environment Research,. Vol 70. pp 1083. (1998).



- RUSTEN, B; HELLSTRÖM F. et al **“Pilot testing and preliminary design of moving bed biofilm reactors for nitrogen removal at the FREVAR wastewater treatment plant”** Water Science and Technology, Vol 41. N°4-5 pp 13 . (2000).
- SAWYER, C. **“Operational results and experience with submerged fixed-film reactors in the pretreatment of industrial effluents”** Water Science and Technology. Vol 41. N°4-5. (2000).
- SAWYER, C. McCarty, P. **“Química para Ingeniería ambiental”** 4ta. Edición. Editorial Mac Graw Hill. Bogotá, Colombia. (2001).
- SHAREKH, H.A. **“Removal of organics from wastewater using a novel - biological hybrid system.”** Water Science and Technology . Vol 43 No. 1 (2001) ( 1<sup>st</sup> world water congress)
- SCHLEGEL, S TEICHGRABER, B. **“Operational results and experience with submerged fixed-film reactors in the pretreatment of industrial effluents”** Water Science and Technology, Vol 41. N°4-5. (2000).
- SEN, D. et al **“Full scale evaluation of nitrification and denitrification on fixed film packing (ring lace) for design of single-sludge nitrogen removal system”** Proceedings of 66<sup>th</sup> Annual water environment Federation Conference and Exposition (1993).
- SEOANEZ, C. **“Aguas Residuales Urbanas Tratamientos naturales de Bajo costo y aprovechamiento”** Colección Ingeniería Medio ambiental. Ediciones Mundi-Prensa. 2da. Edición. Barcelona, España (2001).
- SHAREK, H.A HAMODA, M. F.,. **“Removal of organics from wastewater using a novel - biological hybrid system.”** Water Science and Technology . Vol 43 number 1 (2001) ( 1<sup>st</sup> world water congress)
- SÓTERO DEL RÍO **“Tratamientos de Aguas Residuales”**. –Time Answer Engineering: <http://www.tanswer.cl/> (2001) Santiago de Chile – Chile.

- SPERLING, M **“Lodos Ativados Principios do Tratamento de agua Residuárias”**. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental-DESA Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG, Volumen 4 (1997)
- STENSEL. H.D. et al **“Biological aerated filter evaluation”** Journal Environmental Engineering Vol. 14 (1988). Pp 65T
- TEJERO, I. **“Proyecto de implementación de un reactor de lecho aireado sumergido.”** Grupo biopelícula de la Universidad de Cantabria. España. (1999)
- TEJERO I.; SUÁREZ J.; JÁCOME A.; Y TEMPRANO J. **“Introducción a la Ingeniería Sanitaria y Ambiental (diseño de fangos activos)”**. ISBN 84-607-3989-9. Impreso por Tórculo. Coruña - España. (2001).
- WANNER, K.; KUCMAN K. ; GRAU P. **“Activated sludge process combined with biofilm cultivation”** Water Science and Technology,. Vol 22. Nº2 . (1988). Pp 207-215
- Waterworks SFEA, **“Submerged films-Extended aeration systems”** : <http://www.advanced-bio-tech.com/products.html> (2002).
- WEF **“ Design of municipal wastewater treatment plants. Manual of Practice 8”** Water Environment Federation Alexandria. VA (1998).
- WEF **“Aerobic fixed-growth reactors; a special publication”** Water Environment Federation Alexandria. VA (2000).
- YU, H.; et al. **“Contributions of biofilm versus suspended bacteria in an aerobic circulating- bed biofilm reactor”** Water Science and Technology,. Vol 43. Nº1 . (2001). Pp 303-310.

# ANEXOS

## ANEXO A: DISEÑO DE LOS SEDIMENTADORES

◆ **Criterios de diseño:**

• **Cámara amortiguadora:**

⇒ Flujo distribuido uniformemente y evitar cambios bruscos en la trayectoria.

• **Baffles:**

- ⇒ Evitar que se pierdan los sólidos.
- ⇒ Favorecer el proceso de sedimentación.

• **Cámara de Sedimentación Asimétrica (Sección Trunco-cónica)**

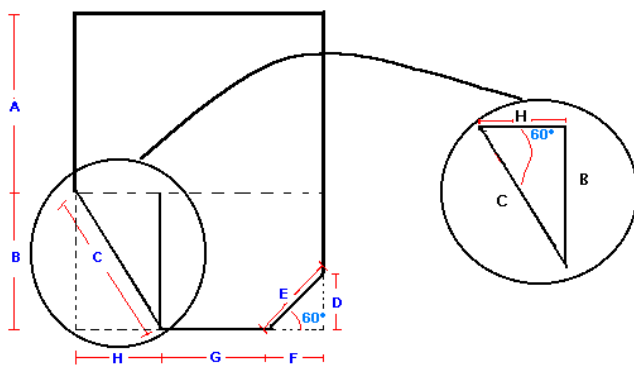
- ⇒ Evitar que los sólidos se adhieran a la pared vertical y se mantenga allí.
- ⇒ Favorecer la sedimentación.

◆ **Parámetros de diseño:**

- ⇒ Rata de desbordamiento superficial: 16- 32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d.
- ⇒ Velocidad Horizontal: 30cm/min
- ⇒ **Caudal Promedio: 2,6 m<sup>3</sup>/d**
- ⇒ **Caudal Mínimo: 1,73 m<sup>3</sup>/d**
- ⇒ **Caudal Máximo: 3,46 m<sup>3</sup>/d**

Utilizando los parámetros de diseño se determinan las dimensiones del sedimentador mediante relaciones trigonométricas.

**A continuación un ejemplo:**



**FIGURA A1: Esquema de los cálculos trigonométricos**

Relaciones trigonométricas:

$$H = 0,28 \text{ m}$$

$$\cos_{60^\circ} = \frac{0,28}{C} \Rightarrow C = \frac{0,28}{\cos_{60^\circ}} =$$

$$C = 0,56 \text{ m}$$

$$\text{Sen}_{60^\circ} = \frac{B}{C} \Rightarrow B = 0,56 \text{ m} * \text{Sen}_{60^\circ} =$$

$$B = 0,48 \text{ m}$$

$$I = A + B \Rightarrow A = I - B =$$

$$A = 0,56 - 0,48 = 0,08 \text{ m}$$

De igual manera se determinan las dimensiones de E, F, D, H etc.

El área del sedimentador es 1040 cm<sup>2</sup> y el volumen respectivo es 624 cm<sup>3</sup>.

## ANEXO B: CÁLCULOS DE LOS REQUERIMIENTOS DE AIRE DE LOS SISTEMAS DE ACUERDO A LAS ECUACIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS.

Los valores de los parámetros considerados de acuerdo a los requerimientos del lodo activado son los siguientes:

$$K_d = 0,06 \text{ d}^{-1}.$$

$$t_h = 5 \text{ hr}$$

$$F/M \text{ (DBO/Kg SSVL*d)} = 0,3 \text{ Kg}$$

$$\text{SSVLM(mg/l)} = 2500$$

$$Q_r/Q=0,5$$

$$Y \text{ (mg SSV/mg DBO)} = 0,03$$

$$\text{DBO entrada promedio} = 150 \text{ mg/l}$$

DBO salida = 0 mg / l ( esto es imposible, pero se diseño para la máxima eficiencia y así cubrir cualquier demanda extra de OD.

$$t_c = 10 \text{ días}$$

- **Caudal:**

El caudal de diseño es:

$$Q = \frac{V}{t_h} = \frac{319,2 \text{ l}}{5 \text{ h}} = 63,8 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$Q = 63,8 \text{ l/h} * (1/3600) = 1,77 * 10^{-2} \text{ l/s} = 1,77 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d \cdot t_c}$$

donde:

Y: crecimiento neto de microorganismos en mg ssv / mg DBO

Kd: constante de decrecimiento  $\text{d}^{-1}$

$t_c = 10$  días (Tiempo celular)

$$Y_{obs} = \frac{0,03}{1 + 0,06 \cdot 10} = 0,019$$

- **Producción de sólidos:**

$$P_x = Y_{obs} \cdot Q \cdot (DBO_e - DBO_s)$$

$$P_x = 0,019 \frac{mgDBO}{mgSSV} \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot \left(150 \frac{mg}{l}\right) \cdot \left(\frac{1000 l}{1 m^3}\right) \cdot \left(\frac{86400 s}{1 día}\right) \cdot \left(\frac{1 Kg}{1000000 mg}\right) = 0,004 Kg SSV / día$$

$$P_x = 0,004 Kg. SSV / día$$

- **DBO a satisfacer (kg O<sub>2</sub>/d) ( en términos de DBO)**

$$DBO_{a \text{ satisfacer}} = Q \cdot (DBO_e - DBO_s)$$

$$DBO_{a \text{ satisfacer}} = 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot (150 - 0) \cdot \left(\frac{1000 l}{1 m^3}\right) \cdot \left(\frac{86400 s}{1 día}\right) \cdot \left(\frac{1 Kg}{1000000 mg}\right) = 0,23 (kg O_2/d)$$

- **DBO a satisfacer (kg O<sub>2</sub>/d) ( en términos de DBO<sub>u</sub>)**

$$DBO_{a \text{ satisfacer (DBOu)}} = \frac{DBO_{a \text{ satisfacer}}}{0,68} = 0,34 \frac{Kg O_2}{d}$$

- **Requerimientos de Oxígeno:**

$$O_x = DBO_{a \text{ satisfacer (DBOu)}} - 1,42 \cdot P_x$$

$$O_x = 0,34 \frac{Kg}{d} - 1,42 \cdot 0,004 = 0,33 \frac{Kg}{d}$$

- **Requerimientos de aire:**

Considerando que el 23,2 % del aire es oxígeno y una tasa de transferencia de oxígeno los difusores al seno del líquido de 8% (generalmente se encuentra entre 8 –15%- se

considera el menor valor para garantizar el suministro) (Además utilizando para densidad del aire un valor promedio de 1,181 kg/día, tenemos en flujo de aire en m<sup>3</sup>/d

$$Ra = \frac{0,33 \text{ kg} / d}{1,181 \text{ kg} / \text{día} * 0,232} = 1,21 \frac{m^3 \text{ de aire}}{d}$$

$$Rm = \frac{1,21 \frac{m^3}{d}}{1440 \frac{\text{min}}{d} * 0,08} = 1,05 * 10^{-2} \frac{m^3}{\text{min}}$$

siendo :

Rm: el requerimiento en m<sup>3</sup> de aire por día.

- **Especificaciones del rotor:**

$$Nw = \frac{No * (\beta * Ca - Co) * \alpha * 1,024^{T-20}}{9,0}$$

donde:

Nw: Kg. Oxígeno transferidos en condiciones reales

No: Kg. Oxígeno transferidos en agua limpia a 20°C y oxígeno disuelto cero.

$\alpha$ : Factor de corrección de transferencia de oxígeno para aguas residuales entre 0,8 y 0,85.

$\beta$ : factor de corrección por salinidad y tensión superficial, en general es 1.

Ca: Concentración de saturación de oxígeno disuelto para el agua residual a temperatura y altura dados en mg/l.

Co: Concentración de oxígeno disuelto en condiciones d funcionamiento, en mg/l.

T: Temperatura , en °C

No = 1,6 Kg. O<sub>2</sub>/Kwh

T= 27° C

$\alpha$  = 0,95

Co = 2 mg/l

$\beta$  = 1

Ca = 8,22 mg/l

$$Nw = \frac{1,6 \text{ Kg} O_2 (1 * 8,22 - 1,5) * 0,85 * 1,024^{26-20}}{9,17} = 1,15 \text{ Kg} O_2 / \text{Kwh}$$

$$Nw = 1,23 \text{ Kg} O_2 / \text{Kwh}$$

**-Potencia requerida en el aireador:**

$$P_w = \frac{O_x}{N_w * 24} = \frac{0,33 \text{ Kg/d}}{1,23 \text{ KgO}_2 / \text{Kwh} * 24 \text{ h/d}} = 0,011 \text{ hp}$$

Para los dos sistemas

$$P_w = 0,022 \text{ hp}$$

Por cuestiones de requerimientos comerciales se ajusta a 0,5 hp.

Utilizando la ecuación de los gases ideales corregida para el aire tenemos la conversión del caudal a presión:

$$P = \frac{M * R * T}{Q}$$

Donde:

P = presión en psia

R = constante universal de los gases 10,73 psia\*pie<sup>3</sup>/ Lmol \*R

T = 26 °C (538,46 R)

Q = (pie<sup>3</sup>/min)

M = flujo másico (Lmol/min)

$$\text{Aire} \left( \frac{\text{Kg.}}{\text{d}} \right) = \frac{0,33 \frac{\text{Kg. O}_2}{\text{d}}}{0,232} = 1,43 \frac{\text{Kg.}}{\text{d}}$$

$$\text{Aire} \left( \frac{\text{Lbm}}{\text{d}} \right) = \frac{1,43 \text{ Kg.} * 2,20 \text{ Lbm}}{\text{d} * \text{Kg}} = 3,16 \frac{\text{Lbm}}{\text{d}}$$

$$\text{Aire} \left( \frac{\text{Lmol}}{\text{min}} \right) = \frac{3,16 \frac{\text{Lbm}}{\text{d}}}{29 \frac{\text{Lbm}}{\text{Lmol}}} * \left( 1440 \frac{\text{min}}{\text{d}} \right) = 7,56 * 10^{-5} \frac{\text{Lmol}}{\text{min}}$$



$$P = \frac{7,56 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Lmol}}{\text{min}} \cdot 10,73 \frac{\text{psia} \cdot \text{pie}^3}{R \cdot \text{Lmol}} \cdot 538,47 R}{1,05 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot \left( \frac{35,31 \text{ pie}^3}{1 \text{ m}^3} \right)} = 1,18 \text{ psia}$$

Estos cálculos se realizan para las tres etapas en una hoja de cálculo de excel, a continuación los resultados:

TABLA B1: Caudales de aire a emplear en la evaluación en cada sistema

Caudales de aire para los tanques						
Tiempo	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (l/hr)	Caudal (m <sup>3</sup> /día)	Caudal (l/min)	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/día)
5	1,75E-04	631,42	15,2	10,52	1,05E-02	15154,2
10	8,92E-05	321,09	7,7	5,35	5,35E-03	7706,2
15	8,12E-03	29231,36	701,6	487,19	4,87E-01	701552,5

TABLA B2: Presiones de aire a emplear en la evaluación en cada sistema

Valores Presión de salida	
Tiempos	Presiones
5	1,18
10	1,18
15	0,01

Como se aprecia en la tabla B2 las presiones en las dos primeras etapa son similares y en la última la cantidad de aire en cada sistema es pequeña. Se requiere 2,36 psia de aire en total para ambos sistemas en las primeras dos etapas. Sin embargo sólo 0,02 psia en la última. En el caso real esta etapa es la primera en evaluarse, por lo tanto requiere un estudio detallado del sistema de aireación y un dispositivo de salida en el compresor muy sensible.

## ANEXO C: INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DEL ANÁLISIS DE TRAZADORES REALIZADO A LOS SISTEMAS EVALUADOS

Las curvas de calibración empleadas en esta evaluación son las siguientes:

### Curva de calibración para el sistema híbrido

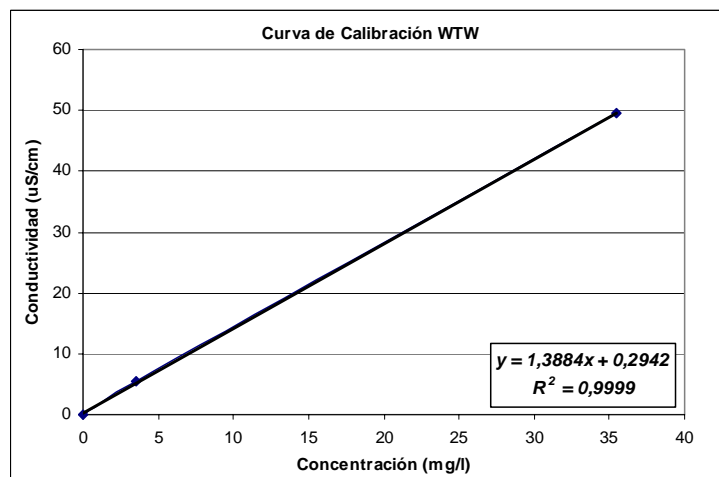


Figura C1: Curva de calibración del híbrido (conductímetro WTW)

### Curva de calibración para el sistema de lodos activados

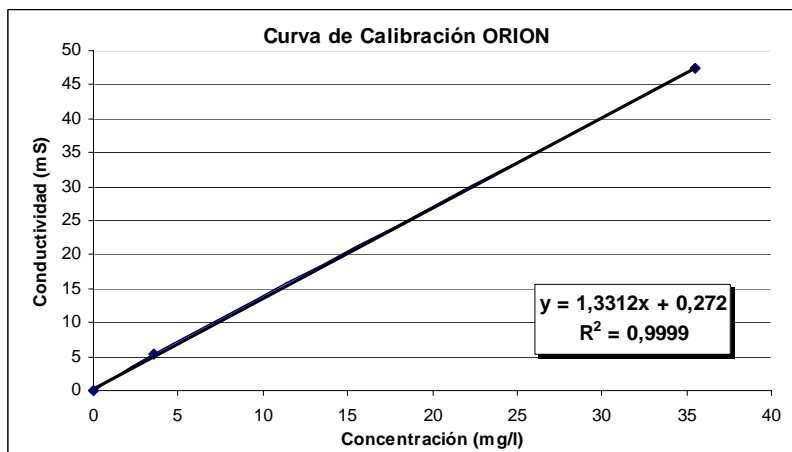
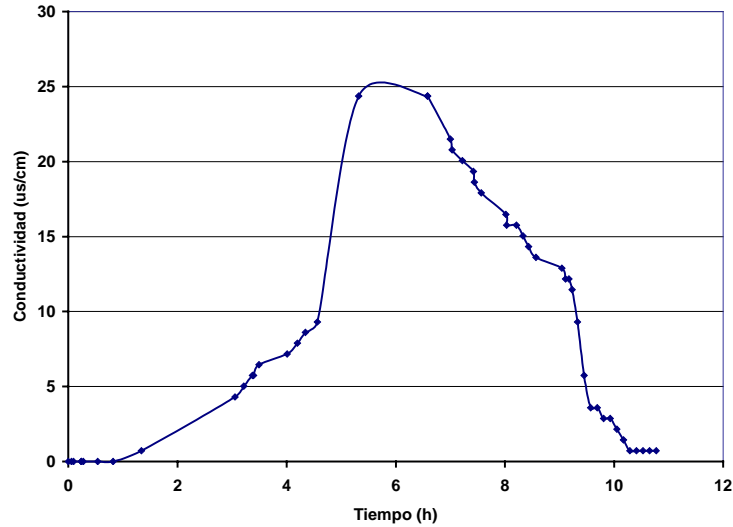


Figura C2: Curva de calibración del lodo activado (conductímetro ORION)

A continuación se presenta el análisis completo realizado a los sistemas según diferentes métodos:

- Sistema Híbrido:

A continuación se presenta en la figura C3 la curva de conductividad obtenida para el sistema híbrido, la cual se parece mucho a la obtenida por la concentración, como era de esperarse, pues el comportamiento de la conductividad refleja el mismo comportamiento de la concentración del trazador.



**FIGURA C3:** Comportamiento de la conductividad en el efluente para el sistema híbrido durante la prueba de trazadores

En la figura C3 se presenta la curva de distribución de edades, en la cual se puede observar que la mayor densidad de partículas abandonan el sistema en un tiempo muy cercano al tiempo de retención teórico. Este comportamiento coincide con el esperado en un sistema con predominio de flujo pistón.

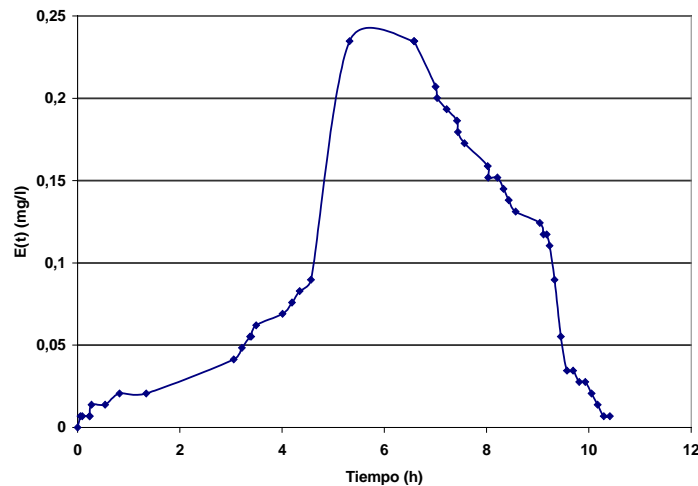


Figura C4: Comportamiento de la distribución de edades para el sistema híbrido

Es importante señalar que estas curvas no pueden ajustarse a ninguna función de manera satisfactoria.

En la figura C5 se puede observar la función acumulativa que presenta la cantidad de partículas que salen en un momento determinado del sistema. En esta curva se puede apreciar una baja densidad en los primeros instantes, pues la mayor cantidad de partículas dejan el sistema casi al final de la prueba.

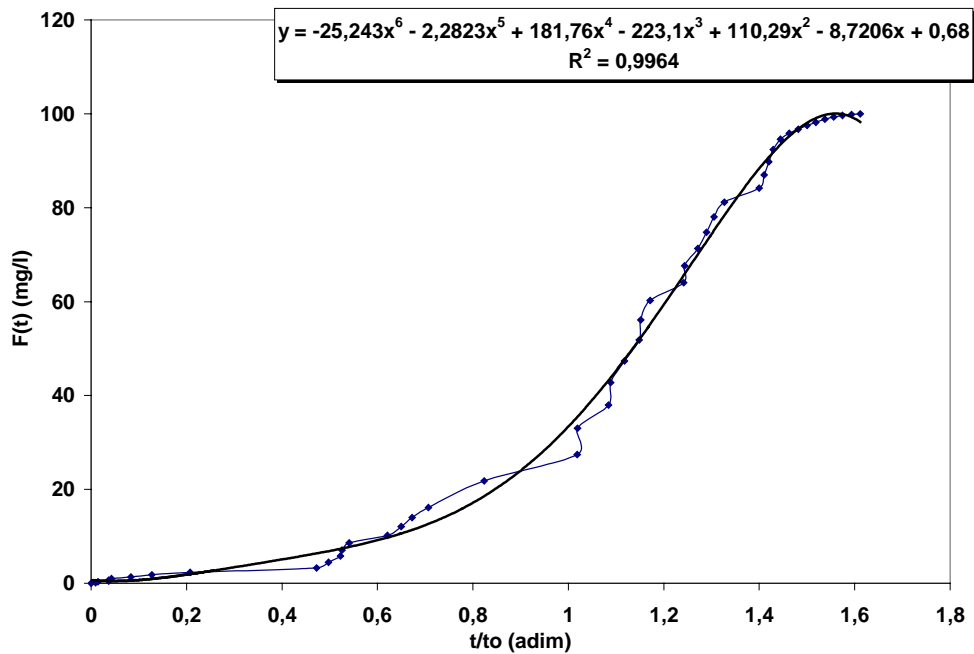


FIGURA C5: Comportamiento de la función acumulativa de trazador que sale del sistema híbrido

Se puede apreciar que la curva se ajusta de manera satisfactoria a una función exponencial de sexto orden.

- **Modelo de N reactores mezcla completa en serie:**

Este modelo permite ajustar al sistema a un conjunto de reactores ideales en serie. Ese conjunto es de reactores mezcla completa. A continuación se presenta el ajuste al modelo de 6 reactores en serie, resultado de la evaluación de los parámetros estadísticos que se presenta en la sección de resultados.

En la figura C6 se puede apreciar que el ajuste a 6 reactores no se parece demasiado a los gráficos teóricos que se presentan generalmente. De hecho se pone de relevancia que se requiere de un número mayor de puntos para definir la curva completamente. Sin embargo, una evaluación de mayor duración era imposible, pues 9 horas y media es tiempo considerable.

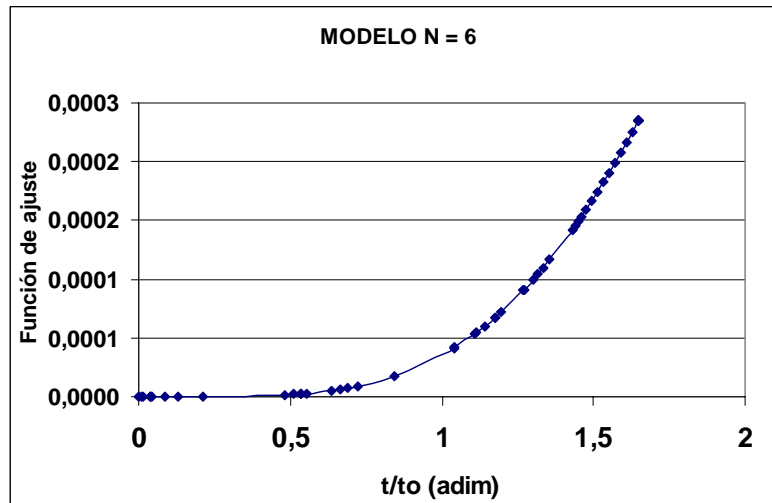


FIGURA C6: Ajuste al modelo de 6 reactores ideales en serie

- Método convencional de evaluación de la curva C

El análisis por el método convencional de la curva de C-Ci respecto al tiempo se presentan en la figura C7

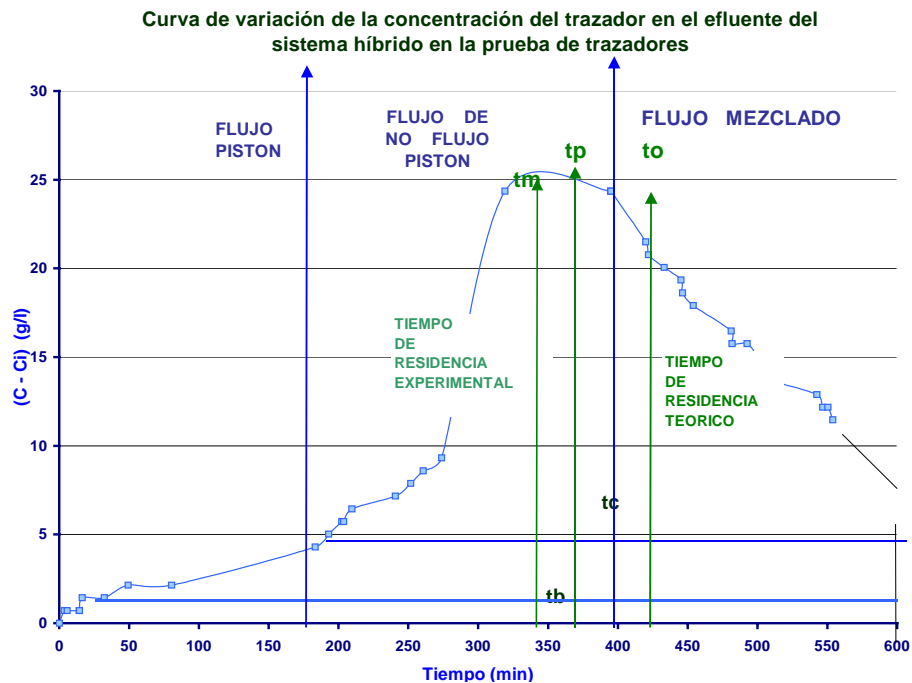


Figura C7: Análisis de la curva C por el método convencional

De esta curva se pueden obtener los parámetros comparativos siguientes:

Tabla C1.- Parámetros resultado del análisis convencional de la curva C

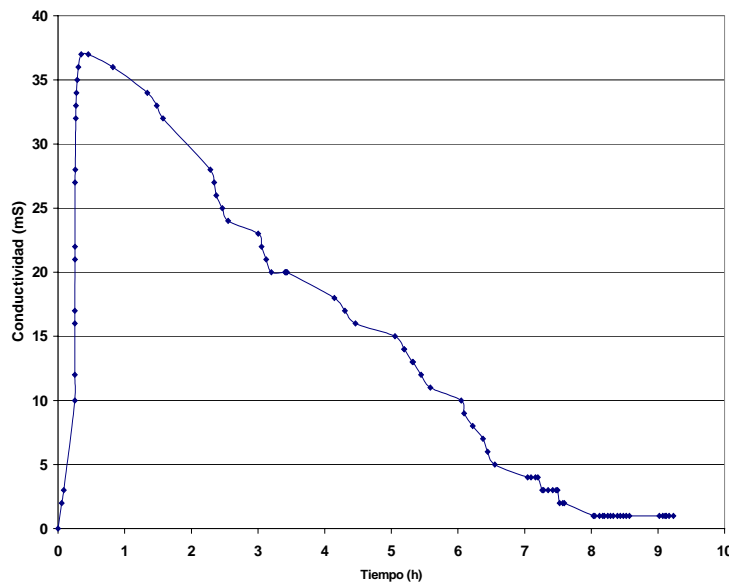
Parámetro	Valor	Comentarios
Tpico máximo (h)	6,585	
ti (h)	0,058	
ti/to	0,09	
tpico/to	0,82	
tm/to	0,397	
tc/to	0,082	
tb/to	0,5	

Lo cual nos lleva a concluir que el sistema presenta un flujo real disperso, con la presencia de cortocircuitos y con tendencia a flujo pistón. Esta tendencia a flujo pistón se debe a la presencia del medio, que disminuye considerablemente el mezclado, como era de esperarse.

• **Sistema de Lodos Activados**

La curva de conductividad respecto al tiempo se presenta en la figura A6:

La curva de conductividad presenta forma similar a la curva de concentración en función del tiempo, como era de esperarse.



**FIGURA C8:** Comportamiento de la conductividad en el efluente para el sistema de lodos activados durante la prueba de trazadores

En la figura C9 se presenta la curva de distribución de edades, en la cual se observa que la mayoría de las partículas abandonan el sistema mucho antes del tiempo de retención teórico, de allí la elevada densidad de las mismas en las primeras horas de evaluación.

Esta curva es características de un sistema de lodos activados, aunque un pico tan temprano indica una combinación de espacios muertos y cortocircuito simultáneamente. Estas características se esperan, pues no existen sistemas reales que no presenten cierto porcentaje d espacios muertos o cortocircuito

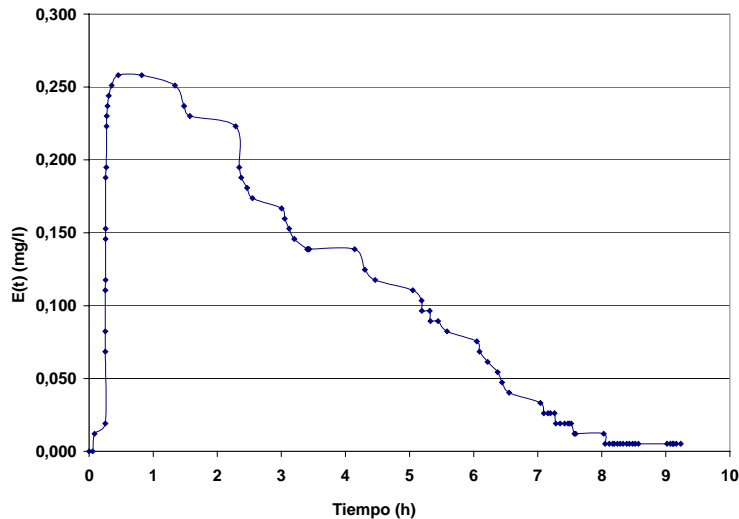


Figura C9: Comportamiento de la distribución de edades para el sistema de lodos activados

En la figura C10 se observa la curva de la función acumulativa en el sistema de lodos activados

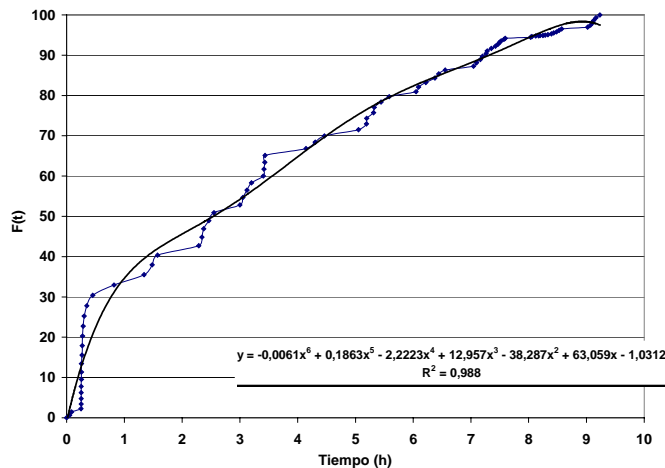


FIGURA C10: Comportamiento de la función acumulativa de trazador que sale del sistema híbrido

En la figura C10 se observa que la mayor densidad de partículas se presenta en las primeras horas, con una tendencia más uniforme. Esto coincide con lo esperado pues en los primeros tiempos de evaluación abandona el tanque la mayoría del trazador empleado.

- **Modelo de N reactores mezcla completa en serie:**

En este caso los resultados se ajustan de manera eficiente a la función de N=2 como se aprecia en la figura C11:

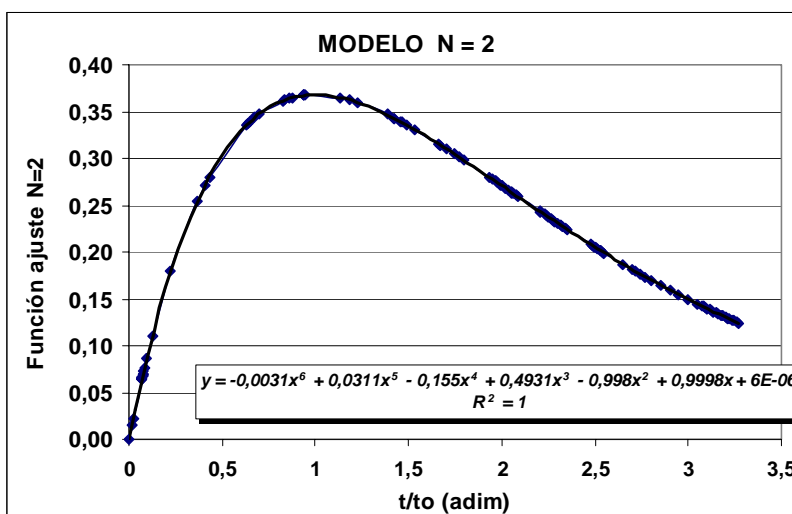


Figura C11: Ajuste a la función N = 2 para el sistema de lodos activados

Es importante señalar que esta curva es muy similar a la obtenida por Yukio Iida en su evaluación hidráulica a un sistema de lodos activados en el año 1988. Este autor señala que los resultados son particularmente susceptibles a ser simulados por un sistema de tanques en serie. (Iida, 1988)

- **Método convencional de evaluación de la curva c**

Al realizar por el método convencional la curva de C-Ci respecto al tiempo se obtiene la figura C12. El análisis de los parámetros que se presentan a continuación complementan la información.



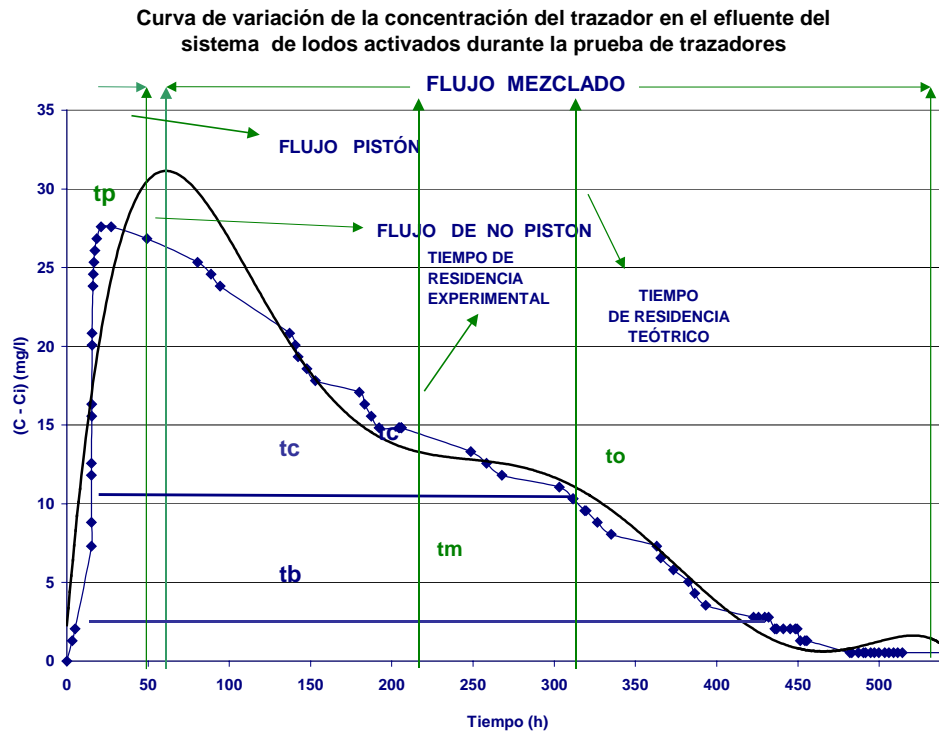


Figura C12: Análisis de la curva C por el método convencional para el sistema de lodos activados

De esta curva se pueden obtener los parámetros comparativos siguientes:

Tabla C2.- Parámetros resultado del análisis convencional de la curva C

Parámetro	Valor	Comentarios
Tpico máximo (h)	0,460	
$t_i$ (h)	0,058	
$t_i/t_o$	0,010	← presencia apreciable de cortocircuito
$t_{pico}/t_o$	0,081	← predominio de flujo mezclado de forma considerable
$t_m/t_o$	0,414	← cortocircuito
$t_c/t_o$	1,029	← flujo mezclado disperso
$t_b/t_o$	1,311	← tiende a flujo mezclado

Lo cual nos lleva a concluir que el sistema presenta un flujo real disperso, con la presencia de cortocircuitos y con tendencia marcada al flujo completamente mezclado. Esta tendencia a flujo mezcla se debe a la ausencia del medio, que permite que la agitación que suministra el sistema de aereación se lleve a cabo uniformemente en todo el sistema.

## ANEXO D: INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA EN LA ETAPA DE ARRANQUE DE LOS SISTEMAS

Perfiles de Oxígeno obtenidos durante el arranque en los sistemas evaluados

Tabla D1: Perfil de Oxígeno día 04-12-03

Lodo Activado		Híbrido			
Punto	OD	Punto		OD	
1a	6,0	1a		6,0	
1b	6,0	1b		6,0	
2a	5,7	2a	6,0	2e	5,8
2b	5,8	2b	5,9	2f	6,0
3a	5,7	2c	6,0	2g	6,0
3b	5,9	2d	6,0	2h	5,9
4a	5,9	3a	6,0	4a	6,0
		3b	6,0	4b	6,0
4b	5,0	5a		6,0	
		5b		6,0	

Tabla D2: Perfil de Oxígeno día 08-12-03

Lodo Activado		Híbrido			
Punto	OD	Punto		OD	
1a	5,4	1a		6,1	
1b	5,2	1b		6,1	
2a	5,2	2a	5,4	2e	5,6
2b	5,0	2b	5,2	2f	5,9
3a	5,0	2c	5,6	2g	5,5
3b	5,2	2d	5,5	2h	5,1
4a	5,2	3a	6,1	4a	6,0
		3b	6,1	4b	6,1
4b	5,2	5a		6,1	
		5b		6,1	

El OD al final de la carga disminuye a medida que aumentan los sólidos en el sistema. Sin embargo, también depende de la carga orgánica presente en el agua con la cual se opera el proceso por lotes.

Tabla D3: Perfil de Oxígeno día 09-12-03

Lodo Activado		Híbrido			
Punto	OD	Punto		OD	
1a	2,8	1a		4,1	
1b	2,6	1b		4,1	
2a	2,6	2a	3,6	2e	3,6
2b	2,5	2b	4,1	2f	4,0
3a	2,4	2c	3,6	2g	3,8
3b	2,5	2d	3,8	2h	3,5
4a	2,6	3a	4,0	4a	4,0
		3b	4,0	4b	4,0
4b	2,62	5a		4,0	
		5b		4,0	

Tabla D4: Perfil de Oxígeno día 24-12-03

Lodo Activado		Híbrido			
Punto	OD	Punto		OD	
1a	5,4	1a		5,0	
1b	5,6	1b		5,0	
2a	5,4	2a	4,2	2e	3,6
2b	5,4	2b	3,7	2f	3,8
3a	5,4	2c	3,8	2g	2,8
3b	5,8	2d	3,6	2h	3,0
4a	5,8	3a	5,0	4a	5,0
	5,8	3b	5,0	4b	5,0
4b	5,8	5a		5,0	
		5b		5,0	

Estos perfiles confirman que la aireación en los sistemas es uniforme.

Curvas de comportamiento del Oxígeno durante la carga par determinar la frecuencia y duración de las cargas.

09-12-03

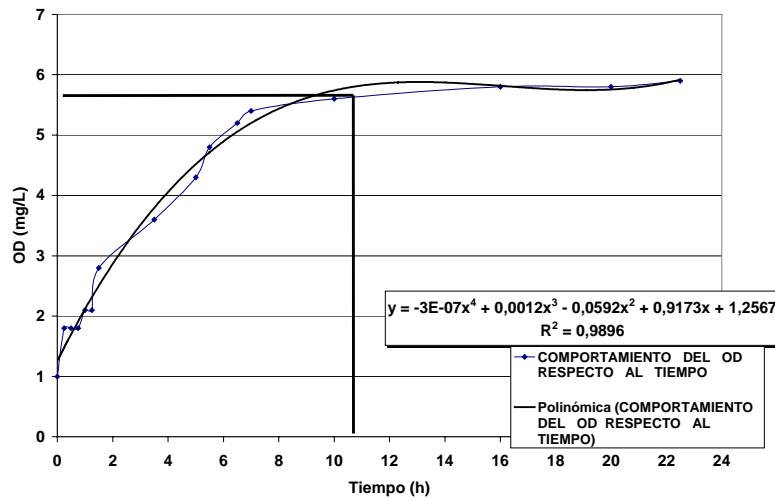


FIGURA D1: Curva de comportamiento del oxígeno para el sistema híbrido para el sexto día de carga

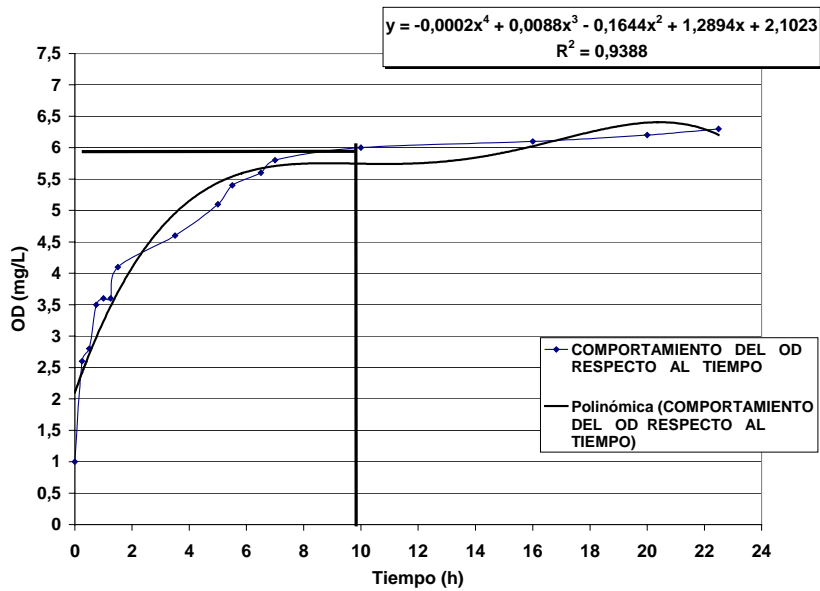


FIGURA D2: Curva de comportamiento del oxígeno para el sistema de lodos activados para el sexto día de carga

11-12-13

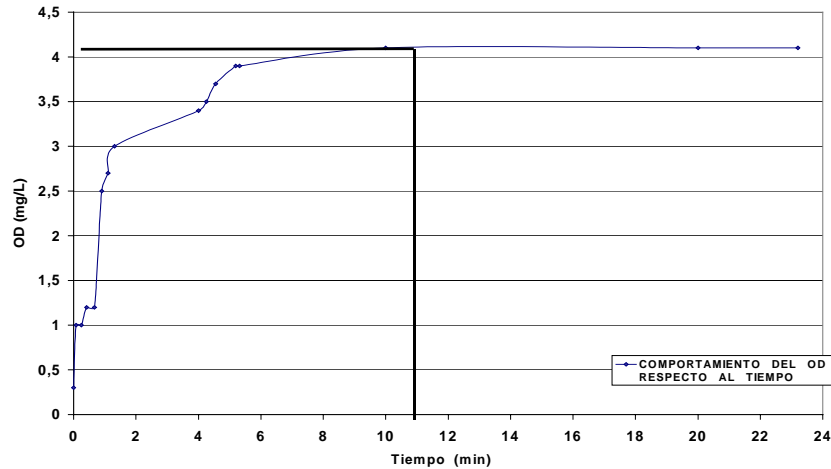


FIGURA D3: Curva de comportamiento del oxígeno para el sistema de lodos activados para el octavo día de carga

Es importante señalar que esta curva no permite realizar ningún tipo de ajuste

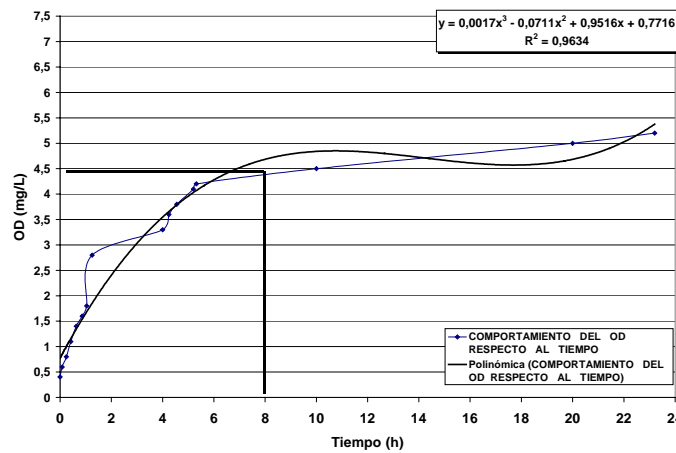


FIGURA D4: Curva de comportamiento del oxígeno para el sistema híbrido para el octavo día de carga

De estas curvas se concluye que entre 8 y 10 h se encuentra la duración óptima del tiempo de carga.

Tabla D5: Tasa de crecimiento durante el período de arranque con una sola carga

Día del mes	Número de Días	sólidos sedimentables (ml/l)	Tasa de crecimiento
03-Dic	2	2	0
04-Dic	3	3	1
05-Dic	4	3	0
06-Dic	5	3	0
07-Dic	6	3,5	0,5
08-Dic	7	4	0,5
09-Dic	8	7,5	3,5
10-Dic	9	7	-0,5
11-Dic	10	10	3
12-Dic	11	10	0
15-Dic	14	15	5
16-Dic	15	22	7
17-Dic	16	25	3
18-Dic	17	31	6
19-Dic	18	31	0
20-Dic	19	31	0
21-Dic	20	31	0
22-Dic	21	35	4
23-Dic	22	35	0
24-Dic	23	40	5
25-Dic	24	43	3
26-Dic	25	50	7
27-Dic	26	50	0
28-Dic	27	60	10
29-Dic	28	60	0
30-Dic	29	72	12
31-Dic	30	72	0
01-Ene	31	72	0
02-Ene	32	72	0
03-Ene	33	80	8

Tabla D6: Tasa de crecimiento durante el período de arranque con dos cargas

Día del mes	Número de Días	sólidos sedimentables (ml/l)	Tasa de crecimiento
04-Ene	34	90	10
05-Ene	35	105	15
06-Ene	36	110	5
07-Ene	37	120	10
08-Ene	38	120	0
09-Ene	39	150	30
10-Ene	40	160	10
11-Ene	41	170	10
12-Ene	42	190	20
13-Ene	43	210	20
14-Ene	44	250	40
15-Ene	45	290	40
16-Ene	46	310	20
17-Ene	47	320	10
18-Ene	48	340	20
19-Ene	49	360	20

De estas dos tablas se concluye que la tasa de crecimiento siempre es positivo y con tendencia a incrementarse si se utilizan dos cargas.

Tabla D6.- Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el arranque para el sistema de lodos activados

UNA SOLA CARGA						
Día del mes	Días	sólidos sedimentables (ml/l)	pH	OD	T (°C)	HORA CARGA
03-Dic	2	2	8,0	5,8	25,5	8:30 a.m.
04-Dic	3	3	7,9	6,5	25,5	9:00 a.m.
05-Dic	4	3	8,2	6,8	27	9:00 a.m.
06-Dic	5	3	8,2	6,8	27	9:00 a.m.
07-Dic	6	3,5	8,0	5,3	27	9:00 a.m.
08-Dic	7	4	8,0	5,3	28	9:00 a.m.
09-Dic	8	7,5	7,7	4,1	22	10:17 a.m.
10-Dic	9	7	7,4	7,2	23	11:15 a.m.
11-Dic	10	10	7,8	5,6	24	10:15 a.m.
12-Dic	11	10	7,9	6	24	10:20 a.m.
15-Dic	14	15	7,8	5	24	11:30 a.m.
16-Dic	15	25	7,6	4,6	23,5	11:30 a.m.
17-Dic	16	30	7,8	8	22	11:30 a.m.
18-Dic	17	35	7,7	5,4	23	11:45 a.m.
19-Dic	18	36	7,7	6,2	22	11:35 a.m.
20-Dic	19	36	7,7	6,2	22	---
21-Dic	20	36	7,7	6,1	22	---
22-Dic	21	42	7,7	6,1	23	11:00 a.m.
23-Dic	22	40	7,7	5,5	22	11:00 a.m.
24-Dic	23	43	8,0	5,6	22	10:36 a.m.
25-Dic	24	51	7,7	5,3	23,5	11:15 a.m.
26-Dic	25	50	7,7	5,2	21,5	10:35 a.m.
27-Dic	26	54	7,7	5,4	22	10:50 a.m.
28-Dic	27	60	7,7	5,3	23	8:45 a.m.
29-Dic	28	60	7,7	5,3	23	8:56 a.m.
30-Dic	29	72	7,8	7,15	20	8:40 a.m.
31-Dic	30	72	7,8	7,15	20	8:56 a.m.
01-Ene	31	72	7,8	7,15	20	8:56 a.m.
02-Ene	32	72	7,7	5,8	20,7	8:56 a.m.
03-Ene	33	80	7,7	5,8	20,7	9:15 a.m.



Tabla D7.- Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el arranque para el sistema de lodos activados cuando se implementan dos cargas

DOS CARGAS											
Antes de la primera carga							Antes de la segunda carga				
Fecha	Día	Sólidos	ph	OD	T	Hora	Sólidos	pH	OD	T	Hora
04-Ene	34	90	7,7	4,8	21,5	8:43 a.m.	110	7,11	2	28,5	4:20 p.m.
05-Ene	35	105	7,7	4,8	21,5	8:43 a.m.	120	7,2	2,2	28	4:20 p.m.
06-Ene	36	110	7,2	0,7	26	8:43 a.m.	140	7,22	2,6	28	4:40 p.m.
07-Ene	37	120	7,3	0,8	26,5	8:43 a.m.	110	7,47	0,3	26,5	4:42 p.m.
08-Ene	38	120	7,5	0,7	27	9:10 a.m.	150	7,13	0,9	35,5	3:45 p.m.
09-Ene	39	150	7,4	0,8	25	8:45 a.m.	110	7,47	0,3	26,5	4:42 p.m.
10-Ene	40	160	7,6	2,05	24,5	8:56 a.m.	150	7,13	0,9	35,5	3:45 p.m.
11-Ene	41	170	7,7	3,3	24	8:40 a.m.	210	7,4	0,8	25	4:36 p.m.
12-Ene	42	190	7,4	0,8	25	8:56 a.m.	205	7,22	0,6	25	4:40 p.m.
13-Ene	43	210	7,5	0,8	24,5	8:56 a.m.	205	7,22	0,6	25	4:40 p.m.
14-Ene	44	250	7,5	0,7	25	8:43 a.m.	205	7,22	0,6	25	4:40 p.m.
15-Ene	45	250	7,6	5,4	21	8:43 a.m.	290	7,45	1	28	2:50 p.m.
16-Ene	46	310	7,5	5	21	9:10 a.m.	320	7,22	0,6	25	2:50 p.m.
17-Ene	47	320	7,5	5	21	8:45 a.m.	340	7,22	1	25	2:50 p.m.
18-Ene	48	340	7,5	5	21	8:56 a.m.	360	7,45	0,6	28	2:50 p.m.
19-Ene	49	360	7,3	0,9	27,5	8:40 a.m.	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla D8.- Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el arranque para el sistema de Híbrido cuando se utiliza una carga

Día	Nº de Días	Sol. Sed	pH	OD	T	Hora
03-Dic	2	0	8,02	5,94	25	8:30 a.m.
04-Dic	3	0	7,82	6,4	24,5	9:00 a.m.
05-Dic	4	0	8,2	6	27	9:00 a.m.
06-Dic	5	0	8	6	26	9:00 a.m.
07-Dic	6	0	8	6,7	26	9:00 a.m.
08-Dic	7	0	8,01	5,5	25	9:00 a.m.
09-Dic	8	0,3	7,64	3,9	26	10:17 a.m.
10-Dic	9	0	7,66	4,1	22	11:15 a.m.
11-Dic	10	0	7,5	7,2	22	10:15 a.m.
12-Dic	11	0	7,77	7,6	22,5	10:20 a.m.
13-Dic	12	0	7,77	7,6	22,5	11:30 a.m.
14-Dic	13	0	7,77	7,6	22,5	11:30 a.m.
15-Dic	14	0	7,77	7,6	22,5	11:30 a.m.
16-Dic	15	0	7,87	4,05	24	11:45 a.m.
17-Dic	16	0	7,64	7	22	11:35 a.m.
18-Dic	17	0	7,61	5,4	23	11:35 a.m.
19-Dic	18	0	7,66	5,1	22	11:35 a.m.
20-Dic	19	0	7,66	5,1	22	---
21-Dic	20	0	7,66	5,1	22	---
22-Dic	21	1	7,77	5,8	23	11:00 a.m.
23-Dic	22	0	7,64	4,8	22	11:00 a.m.
24-Dic	23	0,5	7,88	3,6	22	10:36 a.m.
25-Dic	24	1	7,54	3,6	23	11:15 a.m.
26-Dic	25	0	7,73	4,5	21,5	10:35 a.m.
27-Dic	26	0,5	7,46	4,6	21,5	10:50 a.m.
28-Dic	27	0,2	7,53	4	22,5	8:45 a.m.
29-Dic	28	0,2	7,53	4	22,5	8:56 a.m.
30-Dic	29	0,7	7,67	6,5	20	8:40 a.m.
31-Dic	30	0,7	7,67	6,5	20	8:56 a.m.
01-Ene	31	0,7	7,67	6,5	20	8:56 a.m.
02-Ene	32	2,8	7,63	5,8	20,5	8:56 a.m.
03-Ene	33	2,8	7,63	5,8	20,5	9:15 a.m.
04-Ene	34	2,8	7,63	5,8	20,5	8:43 a.m.
05-Ene	35	0	7,47	4,05	21,5	8:43 a.m.
06-Ene	36	0	7,7	4,6	24	8:43 a.m.
07-Ene	37	0,7	7,73	4	24	8:43 a.m.
08-Ene	38	0,5	7,85	4	25	9:10 a.m.
09-Ene	39	0,1	7,82	3,8	24	8:45 a.m.
10-Ene	40	0,1	7,82	3,8	24	8:56 a.m.
11-Ene	41	1	8,08	4,4	23	8:40 a.m.
12-Ene	42	0,5	7,86	3,3	24	8:56 a.m.
13-Ene	43	0,5	7,86	3,3	24	8:56 a.m.
14-Ene	44	0,5	7,86	3,3	24	8:43 a.m.

15-Ene	45	0,5	7,92	4,4	21,5	8:43 a.m.
16-Ene	46	1,5	7,77	4,6	21	9:10 a.m.
17-Ene	47	1,5	7,77	4,6	21	8:45 a.m.
18-Ene	48	1,5	7,77	4,6	21	8:56 a.m.
19-Ene	49	0	7,77	2,5	25	8:40 a.m.

A continuación se presentan los respectivos gráficos de estos parámetros fisicoquímicos durante el arranque:

**Tabla D9.-** variación de los parámetros fisicoquímicos de control del arranque.

T (°C)					
LODO			Híbrido		
Mínimo	Máximo	Típico	Mínimo	Máximo	Típico
20	28	23	20	27	23
pH					
LODO			Híbrido		
Mínimo	Máximo	Típico	Mínimo	Máximo	Típico
7,2	8,2	7,7	7,5	8,2	7,8
OD					
LODO			Híbrido		
Mínimo	Máximo	Típico	Mínimo	Máximo	Típico
0,7	8,0	4,8	2,5	7,6	5,1

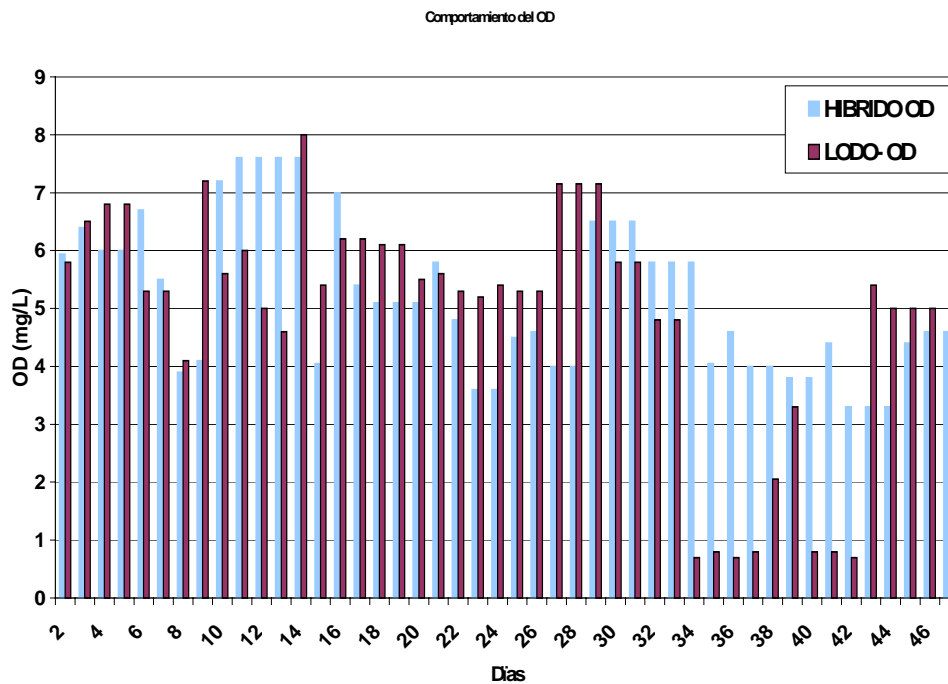


FIGURA D5: Variación del OD en los sistemas durante el período de carga

Se observa en el gráfico que al principios se mantienen los mismos niveles de OD, pero al final del período el OD es considerablemente mayor en el sistema híbrido

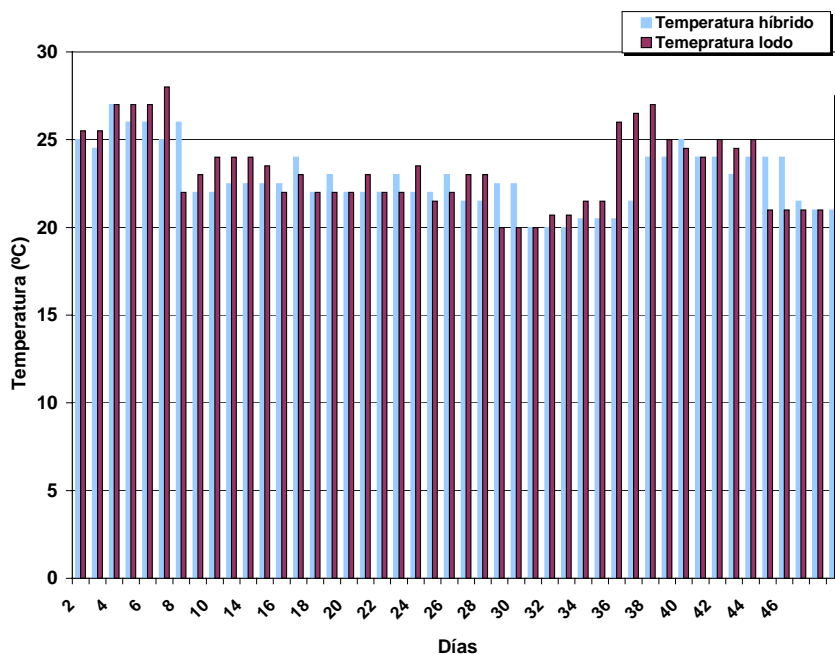


FIGURA D6: Variación de la temperatura en los sistemas durante el período de carga

En la figura B6 s observa que la temperatura se mantiene en esta fase alrededor de 25 °C, para ambos sistemas con picos puntuales para cada sistemas, predominando los del lodo al inicio y los del híbrido al final.

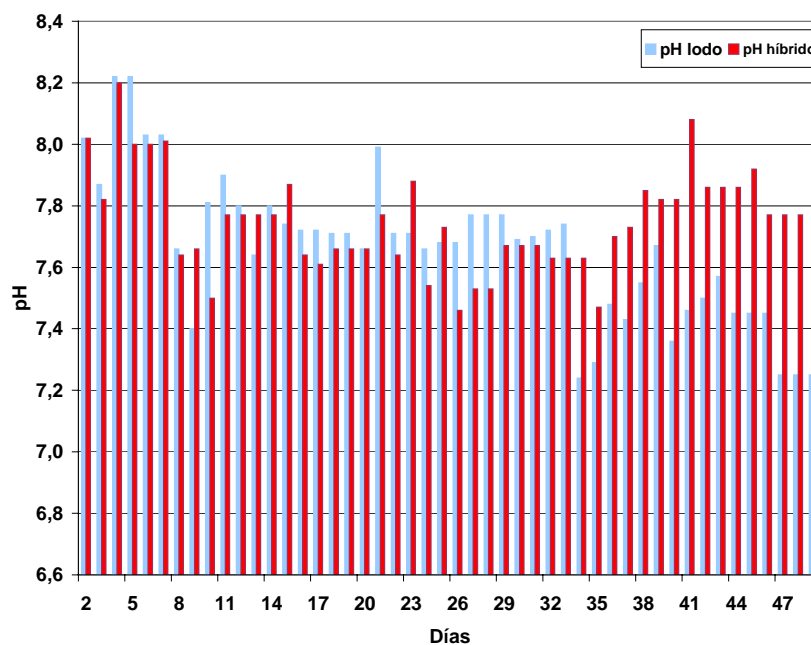


FIGURA D7: Variación del pH en los sistemas durante el período de carga

En la figura D7 se observan valores más elevados de pH en el híbrido, que en varias oportunidades sobrepasa las 8 unidades, esto puede atribuirse a que existen desprendimiento de bicarbonato (Jácome, 2001)

En relación con los sólidos suspendidos volátiles, a continuación en la tabla 26 se presentan los resultados obtenidos en los días en que se realiza el análisis:

Tabla D10: Sólidos en el sistema híbrido durante el arranque

Día de la evaluación	Sólidos sedimentables (ml/l)	SSVLM (mg/l)
06-01-04	0	0
08-01-04	0,5	2
12-01-04	0	54
14-01-04	0,5	56
16-01-04	0,5	47
19-01-04	0,8	20

Como se puede observar en la tabla D10 la cantidad de sólidos Volátiles y los sedimentables son despreciables en el sistema híbrido.

Tabla D11: Sólidos en el sistema de lodos activados durante el arranque

SISTEMA	Sólidos sedimentables (ml/l)	SSVLM (mg/l)
LODO	20	220
	110	784
	120	868
	140	1136
	210	1328
	240	1500
	360	1340

La relación entre estos parámetros se encuentra entre 12 y 14%

## ANEXO D: INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA EN LA EVALUACIÓN EN CONTINUO DE LOS SISTEMAS

Tabla D1: Parámetros fisicoquímicos durante la etapa de puesta a punto

<b>PUESTA A PUNTO</b>						
<b>Día</b>	<b>pH</b>		<b>OD</b>		<b>T</b>	
	<b>lodo</b>	<b>híbrido</b>	<b>lodo</b>	<b>híbrido</b>	<b>lodo</b>	<b>híbrido</b>
<b>Martes 20/01</b>	7,36	7,85	4,2	4,4	23,5	22
<b>Miércoles 21/01</b>	7,23	7,72	2,8	4,8	23	22
<b>Jueves 22/01</b>	7,07	7,44	0,8	3,4	24	21,5
<b>Viernes 23/01</b>	7,04	7,3	1,6	3	24	23
<b>Lunes 26/01</b>	7,39	7,5	2	2,4	23	23
<b>Martes 27/01</b>	7,63	7,78	5,9	3,9	21	23
<b>Miércoles 28/01</b>	7,58	7,8	2,4	3,3	23	23
<b>Jueves 29/01</b>	7,71	7,8	2,1	3,6	22,5	22
<b>Viernes 30/01</b>	7,8	7,68	5,1	2,8	23,5	22,5
<b>Domingo 01/02</b>	7,67	7,7	0,6	3	24	24
<b>Lunes 02/02</b>	7,65	7,65	4,8	0,6	24	24,5
<b>Martes 03/02</b>	7,75	7,67	5,9	1,8	23	24,5
<b>Miércoles 04/02</b>	7,65	7,63	5,4	0,8	21,5	21,5
<b>Jueves 05/02</b>	7,66	7,92	5,4	5,6	21,5	21,5
<b>Viernes 06/02</b>	7,5	7,64	5,4	3,4	21	21
<b>Sábado 07/02</b>	7,52	7,43	0,4	0,6	29	26
<b>Domingo 08/02</b>	7,81	7,72	4,8	3,2	23	23
<b>Lunes 09/02</b>	7,62	7,65	4	2,2	21,5	22,5
<b>Martes 10/02</b>	7,43	7,58	1,9	1	22	22

Tabla D2: Parámetros fisicoquímicos durante la etapa de primera etapa

<b>PRIMERA ETAPA</b>						
	<b>pH</b>		<b>OD</b>		<b>T</b>	
<b>Día</b>	<b>lodo</b>	<b>híbrido</b>	<b>lodo</b>	<b>híbrido</b>	<b>lodo</b>	<b>híbrido</b>
<b>Miércoles 11/02</b>	7,49	7,55	3,5	4,6	22	22
<b>Jueves 12/02</b>	7,41	7,67	0,4	3,5	23	23
<b>Viernes 13/02</b>	7,59	7,84	2,2	4,4	22,5	22,5
<b>Sábado 14/02</b>	7,33	7,78	2	4	23	23
<b>Domingo 15/02</b>	7,43	7,58	1,3	2,2	23,5	23,5
<b>Lunes 16/02</b>	7,47	7,7	2,4	4,6	24	24
<b>Martes 17/02</b>	7,5	7,63	5,1	2,2	22	22
<b>Miércoles 18/02</b>	7,4	7,82	3,2	5,2	21,5	21,5
<b>Jueves 19/02</b>	7,47	7,77	4,6	4,2	21,5	21,5
<b>Viernes 20/02</b>	7,53	7,76	3,4	4	22,5	22,5
<b>Sábado 21/02</b>	7,55	7,86	1,4	3,6	24	24
<b>Domingo 22/02</b>	7,5	7,63	3,9	2,7	23	23
<b>Lunes 23/02</b>	7,53	7,8	0,8	2,8	25	25

Tabla D3: Parámetros fisicoquímicos durante la segunda etapa

<b>SEGUNDA ETAPA</b>									
<b>Día</b>	<b>pH</b>			<b>OD</b>			<b>T</b>		
	<b>Lodo</b>	<b>Híbrido</b>	<b>Afluente</b>	<b>Lodo</b>	<b>Híbrido</b>	<b>Afluente</b>	<b>Lodo</b>	<b>Híbrido</b>	<b>Afluente</b>
<b>Lunes 08/03/04</b>	7,53	7,63	-----	0,4	0,4	-----	27,7	28,8	-----
<b>Martes 09/03/04</b>	7,5	7,63	7,5	3	1,2	0,6	24,3	25,3	27,4
<b>Miércoles 10/03/04</b>	7,54	7,74	7,59	3,4	3,3	1,2	24,6	25,1	27,9
<b>Jueves 11/03/04</b>	7,49	7,59	7,32	3	2,2	0,6	25,5	26,2	29,5
<b>Viernes 12/03/04</b>	7,63	7,67	7,63	0,3	2	0,6	25,8	25,1	29,3
<b>Sábado 13/03/04</b>	7,54	7,77	7,35	0,8	1,6	0,6	25,3	24	31,4
<b>Domingo 14/03/04</b>	7,54	7,63	7,52	2,8	0,6	0,6	25,6	26,1	26,4
<b>Lunes 15/03/04</b>	7,6	7,7	7,11	2,5	1,6	0,8	23,1	24	24,1
<b>Martes 16/03/04</b>	7,6	7,8	7,8	3,6	3	0,6	23,2	23,4	27,3
<b>Miércoles 17/03/04</b>	7,58	7,55	7,65	2,8	2	0,8	24,4	25	27,1
<b>Jueves 18/03/04</b>	7,58	7,79	7,74	0,5	3,4	0,7	24,4	23,8	25,2
<b>Viernes 19/03/04</b>	7,58	7,79	7,74	2,4	3,4	0,8	23,8	23,4	27,3
<b>Sábado 20/03/04</b>	7,73	7,98	7,9	0,8	4,1	1,4	23,4	22,8	24,7
<b>Domingo 21/03/04</b>	7,52	7,82	7,28	0,4	3,8	0,6	26,5	24	28,3
<b>Lunes 22/03/04</b>	7,57	7,14	7,8	5,2	4,2	0,8	23,2	23,2	26,4
<b>Martes 23/03/04</b>	7,48	7,65	7,67	0,8	2,2	0,8	23,7	23,2	27,4
<b>Miércoles 24/03/04</b>	7,5	7,67	7,8	0,6	2,2	0,4	24,3	23,8	27,5
<b>Jueves 25/03/04</b>	7,48	7,82	7,51	0,6	3,4	0,8	233,6	22,9	27
<b>Viernes 26/03/04</b>	7,51	7,86	7,58	0,6	3,8	0,8	25	24,3	28,6
<b>Sábado 27/03/04</b>	7,51	7,76	7,22	0,6	3,6	0,6	23,6	22,9	27
<b>Domingo 28/03/04</b>	7,63	7,73	7,69	2,1	4,6	0,4	22,4	22,4	27,2
<b>Lunes 29/03/04</b>	7,53	7,72	7,49	0,8	4,2	0,6	22,9	22,3	27,7



Tabla D4: Parámetros fisicoquímicos durante la tercera etapa

TERCERA ETAPA									
Día	pH			OD			T		
	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente
Lunes 12/04/04	7,37	7,45	7,15	0,6	0,4	0,6	29,2	29,2	31,9
Martes 13/04/04	7,54	7,53	7,22	1	1	1,4	27	26	25
Miércoles 14/04/04	7,64	7,65	7,04	0,8	1,8	1,6	26,3	25,8	26,6
Jueves 15/04/04	7,65	7,62	7,25	2	1	0,8	25,5	25	27
Viernes 16/04/04	7,63	7,6	7,45	2,4	1,8	1,8	26	25	25
Sábado 17/04/04	7,65	7,62	7,35	2,2	1,6	1,2	26	25	26
Domingo 18/04/04	7,6	7,65	7,45	2	1,8	1,2	25	24	26
Lunes 19/04/04	7,62	7,68	7,52	2	2,8	0,8	25	25	25
Martes 20/04/04	7,47	7,51	7,24	1,8	3,6	1,6	25,5	25,4	26,1
Miércoles 21/04/04	7,54	7,62	7,11	2,6	5,2	2	25,4	24,5	26,1
Jueves 22/04/04	7,57	7,57	7,52	2,6	2,4	1,4	28,3	27,3	31,2
Viernes 23/04/04	7,38	7,51	7,13	2,2	2,6	1,4	25,6	25,7	26
Sábado 24/04/04	7,73	7,78	7,35	2,2	2,9	1,2	25,3	25,3	25,3
Domingo 25/04/04	7,74	7,83	7,6	2,2	3	1,4	26,2	26,6	27
Lunes 26/04/04	7,45	7,61	7,19	2	2,4	0,5	29,5	28,1	29,5
Martes 27/04/04	7,54	7,61	7,27	1,6	2,3	0,6	27,9	27,9	27,2
Miércoles 28/04/04	7,6	7,69	7,24	3,4	3,2	0,6	28,9	28,4	28
Jueves 29/04/04	7,64	7,68	7,07	1,8	2	0,8	27,8	27,9	27,4
Viernes 30/04/04	7,53	7,68	7,34	1,7	2	0,8	28,5	27,5	32,2
Sábado 01/05/04	7,52	7,67	7,67	2	3,2	1	25,2	25,8	26,3
Domingo 02/05/04	7,67	7,77	7,45	2,2	4,6	0,7	25,1	25,6	30,1
Lunes 03/05/04	7,6	7,66	7,31	1,3	1,8	1,3	30,3	31,2	32,2
Martes 04/05/04	7,58	7,73	7,49	2,8	4,4	0,8	28,5	26,4	28,1
Miércoles 05/05/04	7,58	7,7	7,48	2,2	3,4	0,8	27,3	25,9	28,3
Jueves 06/05/04	7,58	7,66	7,27	2	2,2	0,6	27,7	27,8	28,2
Viernes 07/05/04	7,66	7,77	7,44	1,6	2	0,6	28,1	28,1	33,8
Sábado 08/05/04	7,79	7,57	7,09	3	2	1	25,8	27,7	27,2
Domingo 09/05/04	7,66	7,65	7,12	1,6	2,2	0,4	27	26,4	28,3

Tabla D5.- Variación de los parámetros fisicoquímicos durante la etapa de puesta a punto

<b>Parámetro</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>pH-híbrido</b>	7,7	7,4	7,9
<b>pH-lodo</b>	7,5	7,3	7,8
<b>ph-afluente</b>	-----	-----	-----
<b>OD-afluente</b>	0,60	0,4	0,80
<b>OD-híbrido</b>	3,36	0,6	5,40
<b>OD-lodo</b>	3,05	0,40	5,60
<b>T-híbrido</b>	22,45	21,00	26,00
<b>T-lodo</b>	22,92	21,00	29,00

Tabla D6.- Parámetros fisicoquímicos durante la Primera Etapa

<b>Parámetro</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>pH-híbrido</b>	7,7	7,6	7,9
<b>pH-lodo</b>	7,5	7,3	7,6
<b>OD-afluente</b>	0,6	0	1
<b>OD-híbrido</b>	3,7	2,2	5,2
<b>OD-lodo</b>	2,8	0,4	5,1
<b>T-híbrido</b>	22,3	21	24
<b>T-lodo</b>	22,9	21,5	25

Tabla D7.- Variación de los parámetros fisicoquímicos durante Segunda etapa

<b>Parámetro</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>pH-híbrido</b>	7,57	7,11	7,90
<b>pH-lodo</b>	7,55	7,4	7,75
<b>ph-afluente</b>	7,69	7,14	7,98
<b>OD-afluente</b>	0,72	0,4	1,40
<b>OD-híbrido</b>	1,70	0,3	5,20
<b>OD-lodo</b>	2,77	0,4	4,60
<b>T-afluente</b>	26,86	24,1	29,50
<b>T-híbrido</b>	24,25	22,40	28,80
<b>T-lodo</b>	23,54	22,3	27,70
<b>Cond-afluente</b>	0,70	0,57	0,80
<b>cond-lodo</b>	0,60	0,532	0,67
<b>Cond-híbrido</b>	0,63	0,584	0,68

Tabla D8.- Parámetros fisicoquímicos durante la Tercera Etapa

<b>Parámetro</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>pH-híbrido</b>	7,31	7,04	7,67
<b>pH-lodo</b>	7,59	7,37	7,79
<b>ph-afluente</b>	7,65	7,45	7,83
<b>OD-afluente</b>	1,03	0,4	2,00
<b>OD-híbrido</b>	1,99	0,6	3,40
<b>OD-lodo</b>	2,49	0,4	5,20
<b>Cond-afluente</b>	0,68	0,58	0,85
<b>cond-lodo</b>	0,65	0,601	0,70
<b>Cond-híbrido</b>	0,65	0,56	0,71
<b>T-afluente</b>	27,89	25	33,80
<b>T-híbrido</b>	26,93	25,00	30,30
<b>T-lodo</b>	26,59	24	31,20

## ANEXOS E: RESULTADOS DE LOS SÓLIDOS PRESENTES EN LOS SISTEMAS DURANTE LA EVALUACION

Tabla E1: Resultados de los sólidos durante la puesta a punto de los sistemas.

	Sistema de Lodos Activados		Sistema Híbrido	
Fecha	SSTLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	SSTLM (mg/l)	SSVTLM (mg/l)
28-Enero 04	-----	-----	-----	-----
02-Febrero 04	500	375	60	47
04-Febrero 04	356	260	60	48
09-Febrero 04	272	204	196	66

Tabla E2.- Comportamiento de los sólidos durante la primera etapa

	Sistema de Lodos Activados		Sistema Híbrido	
Fecha	SSTLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	SSTLM (mg/L)	SSVLM (mg/l)
<b>11-Feb</b>	316	230	200	64
<b>13-Feb</b>	408	300	62	62
<b>16-Feb</b>	624	524	22	22
<b>18-Feb</b>	652	520	28	20
<b>20-Feb</b>	1250	982	20	4
<b>23-Feb</b>	***	***	***	***
<b>25-Feb</b>	1258	982	22	18

Tabla E3.- Comportamiento de los sólidos durante la segunda etapa

	Sistema de Lodos Activados		Sistema Híbrido	
Fecha	SSTLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	SSTLM (mg/L)	SSVLM (mg/l)
16-Mar	242	182	40	24
18-Mar	602	482	46	44
20-Mar	635	476	53	37
27-Mar	586	432	52	34
29-Mar	735	590	48	30

Tabla E4.- Comportamiento de los sólidos durante la tercera etapa

	Sistema de Lodos Activados		Sistema Híbrido	
Fecha	SSTLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	SSTLM (mg/L)	SSVLM (mg/l)
16-Abr	1254	744	50	43
20-Abr	1310	778	70	54
22-Abr	1436	956	80	62
26-Abr	1440	1012	90	73
28-Abr	1470	1040	100	70
30-Abr	1392	983	88	80
03-May	1180	950	100	92

Tabla E5: Resultados de los sólidos sedimentables durante la puesta a punto de los sistemas.

<b>Etapa: Puesta a punto</b>		
<b>Día</b>	<b>LODO</b>	<b>HIBRIDO</b>
<b>Martes 20/01</b>	290	0
<b>Miércoles 21/01</b>	290	0,2
<b>Jueves 22/01</b>	300	0,6
<b>Viernes 23/01</b>	340	2
<b>Lunes 26/01</b>	130	0,1
<b>Martes 27/01</b>	150	0,5
<b>Miércoles 28/01</b>	160	0,7
<b>Jueves 29/01</b>	120	0
<b>Viernes 30/01</b>	45	1,5
<b>Domingo 01/02</b>	40	1
<b>Lunes 02/02</b>	60	5
<b>Martes 03/02</b>	70	0,5
<b>Miércoles 04/02</b>	80	1
<b>Jueves 05/02</b>	68	0,4
<b>Viernes 06/02</b>	68	0,4
<b>Sábado 07/02</b>	68	0,4
<b>Domingo 08/02</b>	85	0,2
<b>Lunes 09/02</b>	45	9
<b>Martes 10/02</b>	50	0

Tabla E6: Resultados de los sólidos sedimentables durante la primera Etapa de los sistemas.

<b>Primera Etapa</b>		
<b>Miércoles 11/02</b>	24	0
<b>Jueves 12/02</b>	120	0
<b>Viernes 13/02</b>	65	0
<b>Sábado 14/02</b>	80	0
<b>Domingo 15/02</b>	120	0,5
<b>Lunes 16/02</b>	80	0,4
<b>Martes 17/02</b>	130	0,1
<b>Miércoles 18/02</b>	120	2
<b>Jueves 19/02</b>	90	0,1
<b>Viernes 20/02</b>	85	2,5
<b>Sábado 21/02</b>	70	5
<b>Domingo 22/02</b>	50	7
<b>Lunes 23/02</b>	80	1,5
<b>Martes 24/02</b>	90	3
<b>Miércoles 25/02</b>	100	4,5

Tabla E6: Resultados de los sólidos sedimentables durante la Segunda Etapa de los sistemas.

<b>Segunda Etapa</b>		
<b>Lunes 08/03/04</b>	70	2
<b>Martes 09/03/04</b>	60	2
<b>Miércoles 10/03/04</b>	65	0,5
<b>Jueves 11/03/04</b>	55	1
<b>Viernes 12/03/04</b>	30	0
<b>Sábado 13/03/04</b>	35	0,5
<b>Domingo 14/03/04</b>	35	0,5
<b>Lunes 15/03/04</b>	35	9
<b>Martes 16/03/04</b>	35	0,1
<b>Miércoles 17/03/04</b>	30	0,5
<b>Jueves 18/03/04</b>	30	0,5
<b>Viernes 19/03/04</b>	30	3
<b>Sábado 20/03/04</b>	30	0,5
<b>Domingo 21/03/04</b>	35	0,5
<b>Lunes 22/03/04</b>	35	0,5
<b>Martes 23/03/04</b>	48	0,5
<b>Miércoles 24/03/04</b>	48	0,5
<b>Jueves 25/03/04</b>	48	0,5
<b>Viernes 26/03/04</b>	40	0
<b>Sábado 27/03/04</b>	45	0,5
<b>Domingo 28/03/04</b>	45	0,5
<b>Lunes 29/03/04</b>	45	0,5



Tabla E6: Resultados de los sólidos sedimentables durante la Tercera Etapa de los sistemas.

<b>Tercera Etapa</b>		
<b>Lunes 12/04/04</b>	25	0
<b>Martes 13/04/04</b>	25	0
<b>Miércoles 14/04/04</b>	25	0
<b>Jueves 15/04/04</b>	25	0
<b>Viernes 16/04/04</b>	20	0
<b>Sábado 17/04/04</b>	20	0
<b>Domingo 18/04/04</b>	25	2
<b>Lunes 19/04/04</b>	25	1,5
<b>Martes 20/04/04</b>	33	0,5
<b>Miércoles 21/04/04</b>	30	0,5
<b>Jueves 22/04/04</b>	30	0,5
<b>Viernes 23/04/04</b>	25	0,5
<b>Sábado 24/04/04</b>	25	0,5
<b>Domingo 25/04/04</b>	25	0,5
<b>Lunes 26/04/04</b>	25	0,5
<b>Martes 27/04/04</b>	25	0,5
<b>Miércoles 28/04/04</b>	25	0,5
<b>Jueves 29/04/04</b>	25	0,5
<b>Viernes 30/04/04</b>	25	0,5
<b>Sábado 01/05/04</b>	20	0,5
<b>Domingo 02/05/04</b>	20	0,5
<b>Lunes 03/05/04</b>	20	0,5
<b>Martes 04/05/04</b>	20	0,5

## ANEXOS F: INFORMACION RELACIONADA CON LOS MUESTREOS COMPUESTOS

### Etapa 1:

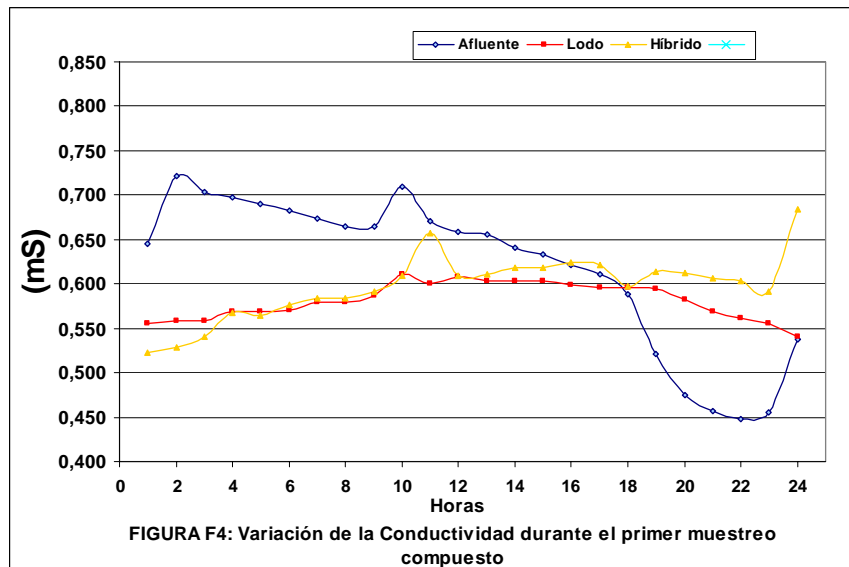
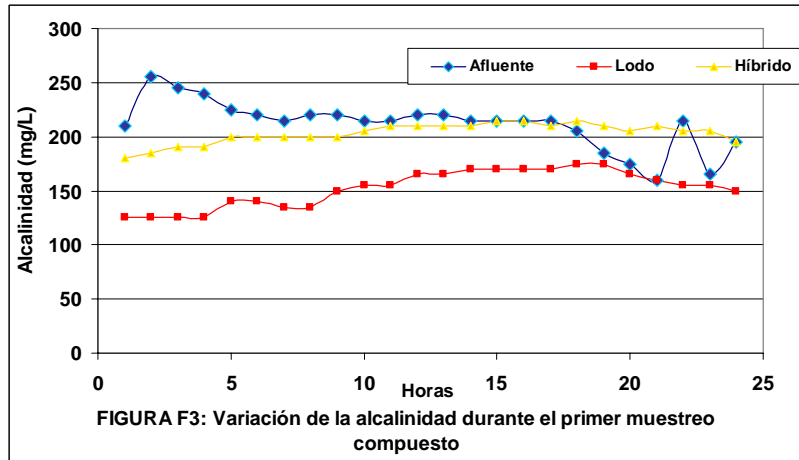
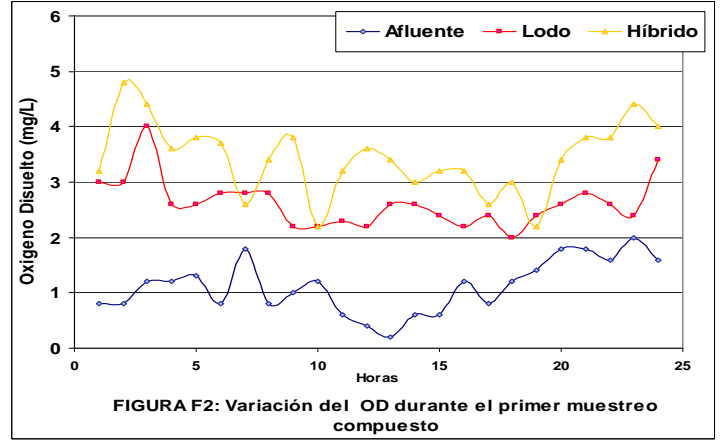
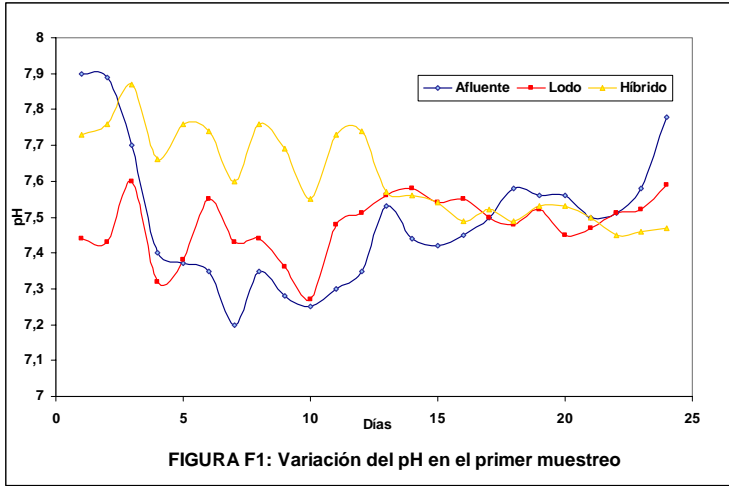
### Muestreo Compuesto 1 (Días: 26-02-04 y 02-03-04)

Tabla F1: Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la primera etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	7,90	7,44	7,73	0,80	3,00	3,20
2	7,89	7,43	7,76	0,80	3,00	4,80
3	7,70	7,60	7,87	1,20	4,00	4,40
4	7,40	7,32	7,66	1,20	2,60	3,60
5	7,37	7,38	7,76	1,30	2,60	3,80
6	7,35	7,55	7,74	0,80	2,80	3,70
7	7,20	7,43	7,60	1,80	2,80	2,60
8	7,35	7,44	7,76	0,80	2,80	3,40
9	7,28	7,36	7,69	1,00	2,20	3,80
10	7,25	7,27	7,55	1,20	2,20	2,20
11	7,30	7,48	7,73	0,60	2,30	3,20
12	7,35	7,51	7,74	0,40	2,20	3,60
13	7,53	7,56	7,77	0,20	2,60	3,40
14	7,44	7,58	7,79	0,60	2,40	3,00
15	7,42	7,54	7,75	0,60	2,20	3,20
16	7,45	7,55	7,74	1,20	2,40	3,20
17	7,50	7,50	7,70	0,80	2,00	2,60
18	7,58	7,48	7,70	1,20	2,40	3,00
19	7,56	7,52	7,74	1,40	2,20	3,40
20	7,56	7,45	7,78	1,80	2,60	3,80
21	7,50	7,47	7,78	1,80	2,80	3,80
22	7,51	7,51	7,79	1,60	2,60	4,00
23	7,58	7,52	7,82	2,00	2,40	4,40
24	7,78	7,59	7,88	1,60	3,40	4,00

Tabla F2: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la primera etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	210	125	180	0,645	0,556	0,523
2	255	125	185	0,722	0,558	0,528
3	245	125	190	0,704	0,558	0,541
4	240	125	190	0,698	0,569	0,567
5	225	140	200	0,690	0,569	0,564
6	220	140	200	0,682	0,571	0,577
7	215	135	200	0,673	0,580	0,584
8	220	135	200	0,665	0,580	0,584
9	220	150	200	0,665	0,587	0,591
10	215	155	205	0,710	0,611	0,610
11	215	155	210	0,670	0,601	0,607
12	220	165	210	0,658	0,603	0,610
13	220	165	210	0,656	0,604	0,611
14	215	170	210	0,641	0,603	0,618
15	215	170	215	0,633	0,603	0,619
16	215	170	215	0,621	0,599	0,624
17	215	170	210	0,611	0,596	0,622
18	205	175	215	0,589	0,596	0,598
19	185	175	210	0,521	0,594	0,614
20	175	165	205	0,475	0,583	0,613
21	160	160	210	0,457	0,569	0,607
22	215	155	205	0,448	0,561	0,603
23	165	155	205	0,456	0,555	0,591
24	195	150	195	0,537	0,541	0,584



**Etapa 1:**

## Muestreo Compuesto 2

Tabla F3: Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la primera etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	7,75	7,45	7,78	0,50	4,00	4,00
2	7,79	7,51	7,75	1,30	3,40	3,20
3	7,68	7,54	7,80	1,60	3,20	3,20
4	7,60	7,48	7,78	1,40	2,70	3,60
5	7,52	7,48	7,78	1,20	3,00	3,60
6	7,34	7,55	7,78	1,40	3,70	3,20
7	7,32	7,42	7,76	1,60	2,00	2,60
8	7,29	7,52	7,82	0,80	2,50	2,80
9	7,17	7,53	7,82	0,80	2,80	3,20
10	7,23	7,51	7,73	1,00	2,40	2,80
11	7,21	7,46	7,70	0,80	2,40	2,20
12	7,26	7,41	7,72	1,40	2,90	3,20
13	7,21	7,46	7,69	1,50	1,60	2,40
14	7,29	7,48	7,62	2,20	2,20	2,60
15	7,18	7,33	7,58	2,00	2,40	2,50
16	7,35	7,47	7,66	1,80	2,00	2,20
17	7,30	7,52	7,67	1,40	2,80	2,80
18	7,49	7,53	7,60	1,80	2,60	2,20
19	7,30	7,50	7,60	1,60	3,00	2,80
20	7,33	7,49	7,74	0,80	2,80	3,20
21	7,33	7,43	7,73	2,20	2,20	3,40
22	7,43	7,25	7,70	2,00	2,60	4,20
23	7,44	7,54	7,75	3,00	3,40	4,40
24	7,52	7,55	7,83	1,80	3,40	4,30

Tabla F4: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la primera etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	255	115	180	0,670	0,670	0,567
2	250	115	195	0,724	0,534	0,553
3	250	140	205	0,745	0,532	0,567
4	255	130	200	0,747	0,533	0,575
5	250	120	205	0,754	0,539	0,581
6	245	120	205	0,731	0,543	0,593
7	235	125	205	0,723	0,554	0,593
8	235	130	210	0,710	0,546	0,605
9	205	135	195	0,693	0,572	0,606
10	225	140	210	0,672	0,576	0,614
11	225	140	210	0,714	0,572	0,635
12	225	140	210	0,691	0,578	0,627
13	225	140	210	0,676	0,582	0,640
14	220	155	210	0,677	0,589	0,640
15	220	160	215	0,664	0,590	0,645
16	220	160	215	0,661	0,594	0,647
17	220	170	215	0,650	0,596	0,650
18	215	170	215	0,633	0,602	0,655
19	195	180	215	0,567	0,597	0,645
20	185	170	220	0,534	0,593	0,638
21	180	175	215	0,508	0,585	0,631
22	165	170	205	0,492	0,578	0,621
23	170	170	210	0,495	0,569	0,604
24	190	160	200	0,545	0,561	0,597

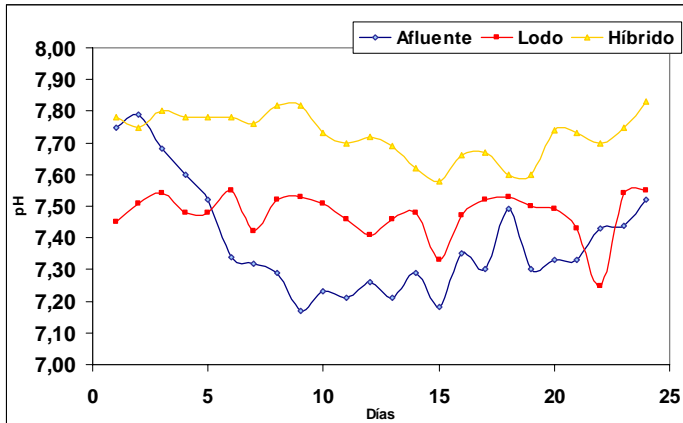


FIGURA F5: Variación del pH en el segundo muestreo

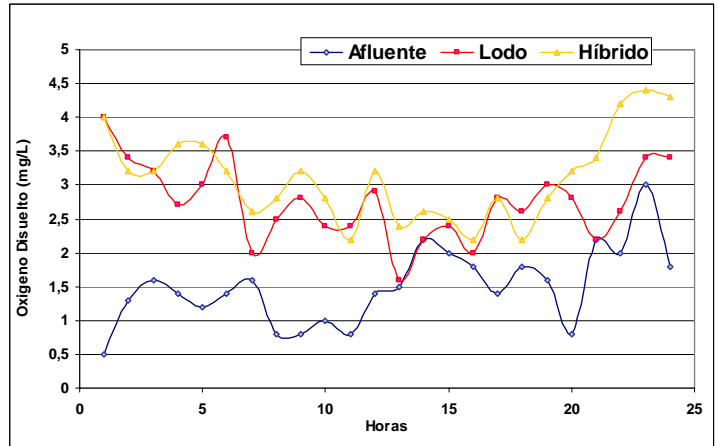


FIGURA F6: Variación del OD durante el segundo muestreo

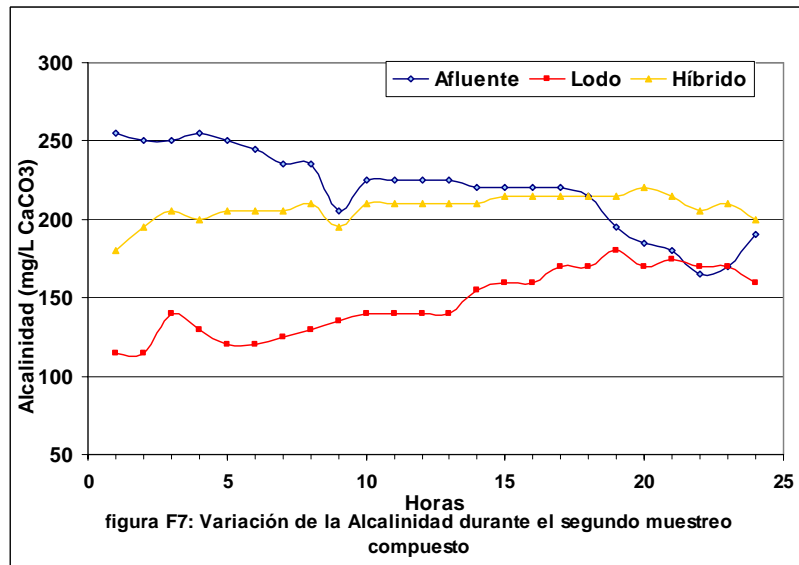


figura F7: Variación de la Alcalinidad durante el segundo muestreo compuesto

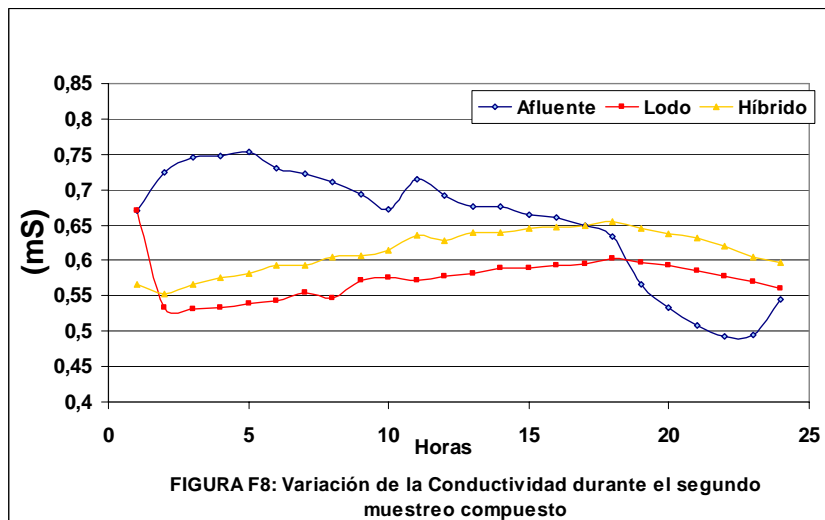


FIGURA F8: Variación de la Conductividad durante el segundo muestreo compuesto

## Etapa 2: (Días 30 y 31 de marzo y 1 de abril)

### Muestreo Compuesto 1:

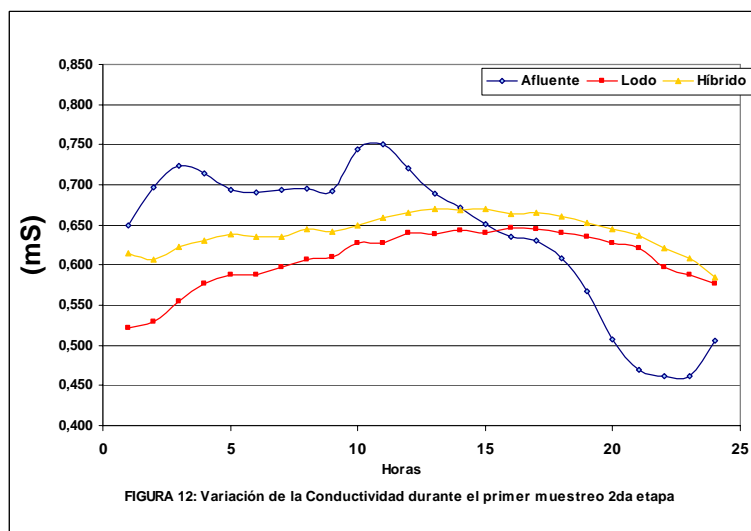
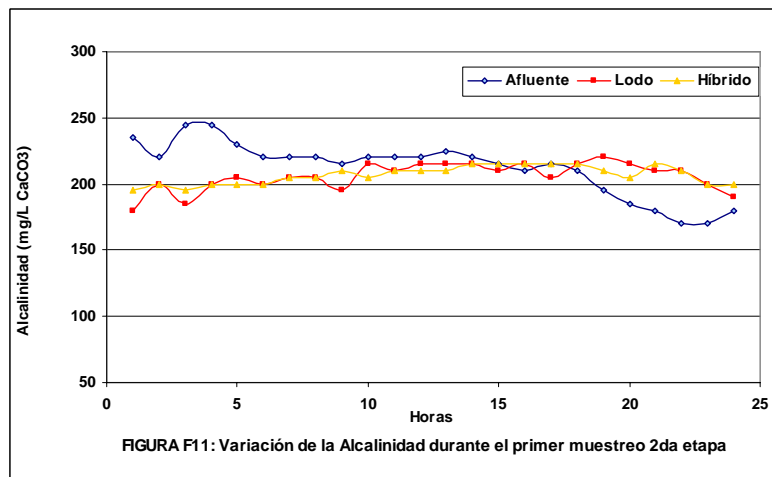
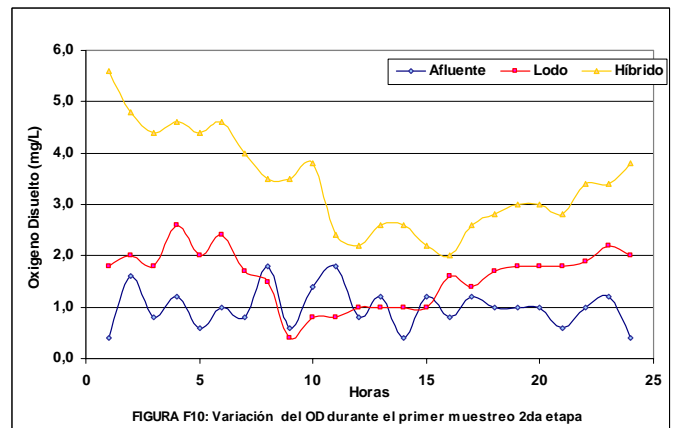
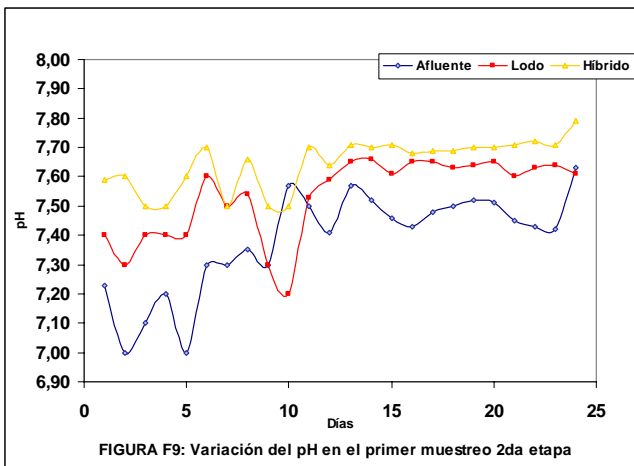
Tabla F5: Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la segunda etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	7,23	7,40	7,59	0,4	1,8	5,6
2	7,00	7,30	7,60	1,6	2,0	4,8
3	7,10	7,40	7,50	0,8	1,8	4,4
4	7,20	7,40	7,50	1,2	2,6	4,6
5	7,00	7,40	7,60	0,6	2,0	4,4
6	7,30	7,60	7,70	1,0	2,4	4,6
7	7,30	7,50	7,50	0,8	1,7	4,0
8	7,35	7,54	7,66	1,8	1,5	3,5
9	7,30	7,30	7,50	0,6	0,4	3,5
10	7,57	7,20	7,50	1,4	0,8	3,8
11	7,50	7,53	7,70	1,8	0,8	2,4
12	7,41	7,59	7,64	0,8	1,0	2,2
13	7,57	7,65	7,71	1,2	1,0	2,6
14	7,52	7,66	7,70	0,4	1,0	2,6
15	7,46	7,61	7,71	1,2	1,0	2,2
16	7,43	7,65	7,68	0,8	1,6	2,0
17	7,48	7,65	7,69	1,2	1,4	2,6
18	7,50	7,63	7,69	1,0	1,7	2,8
19	7,52	7,64	7,70	1,0	1,8	3,0
20	7,51	7,65	7,70	1,0	1,8	3,0
21	7,45	7,60	7,71	0,6	1,8	2,8
22	7,43	7,63	7,72	1,0	1,9	3,4
23	7,42	7,64	7,71	1,2	2,2	3,4
24	7,63	7,61	7,79	0,4	2,0	3,8



Tabla F6: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la segunda etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	235	180	195	0,650	0,522	0,614
2	220	200	200	0,697	0,529	0,607
3	245	185	195	0,724	0,555	0,623
4	245	200	200	0,715	0,577	0,631
5	230	205	200	0,693	0,588	0,639
6	220	200	200	0,69	0,588	0,636
7	220	205	205	0,694	0,597	0,635
8	220	205	205	0,695	0,607	0,644
9	215	195	210	0,692	0,61	0,642
10	220	215	205	0,744	0,628	0,65
11	220	210	210	0,751	0,628	0,659
12	220	215	210	0,721	0,64	0,666
13	225	215	210	0,689	0,639	0,67
14	220	215	215	0,671	0,643	0,668
15	215	210	215	0,651	0,64	0,67
16	210	215	215	0,636	0,646	0,664
17	215	205	215	0,631	0,645	0,665
18	210	215	215	0,609	0,64	0,66
19	195	220	210	0,567	0,635	0,652
20	185	215	205	0,508	0,627	0,644
21	180	210	215	0,47	0,621	0,637
22	170	210	210	0,462	0,597	0,621
23	170	200	200	0,462	0,588	0,608
24	235	180	195	0,506	0,577	0,585



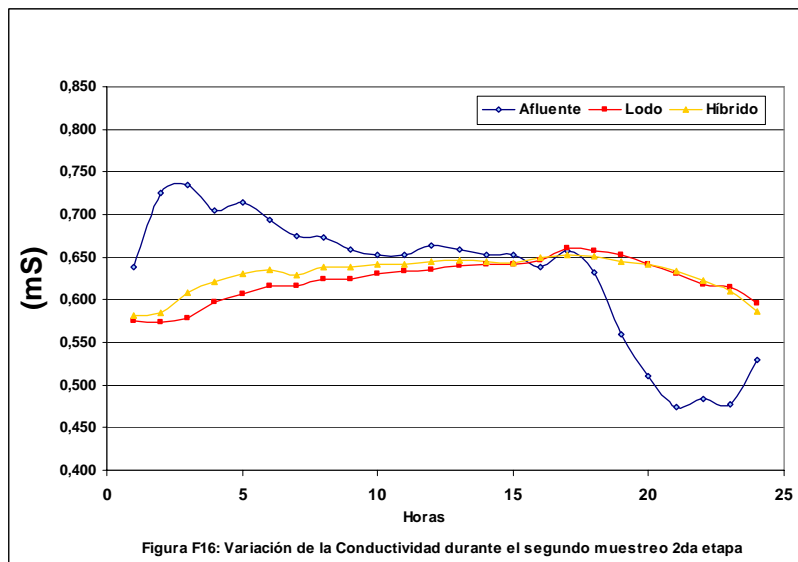
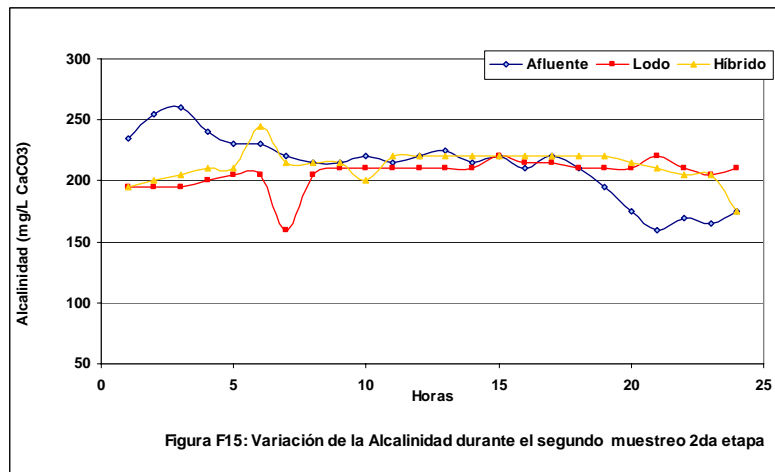
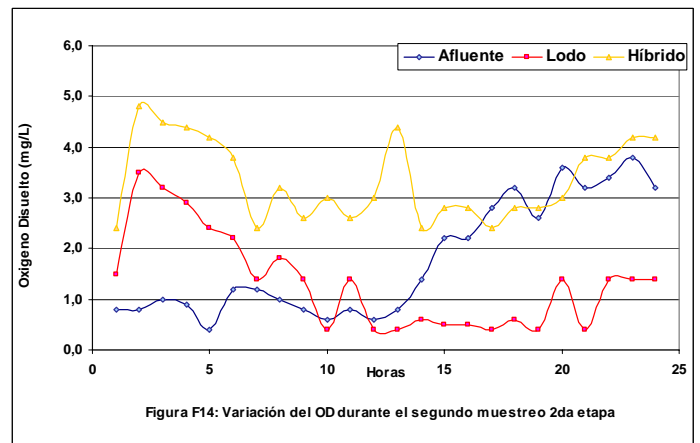
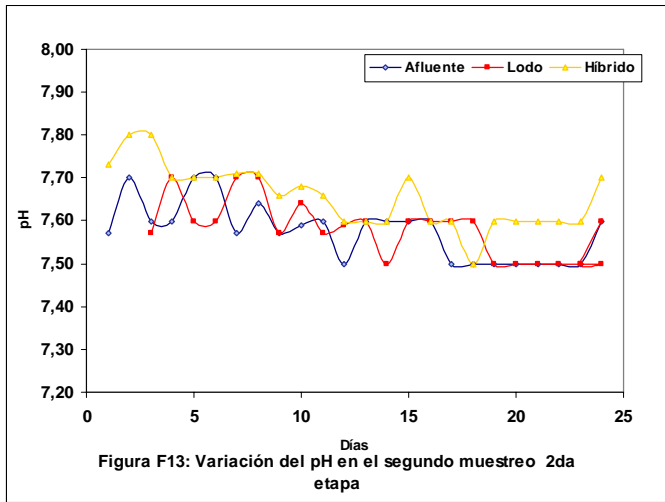
**Etapa 2:**  
**Muestreo Compuesto 2:**

Tabla F7: Parámetros fisicoquímicos durante el segundo muestreo de la segunda etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	7,87	7,57	7,73	0,8	1,5	2,4
2	7,90	7,70	7,80	0,8	3,5	4,8
3	7,70	7,60	7,80	1,0	3,2	4,5
4	7,50	7,60	7,70	0,9	2,9	4,4
5	7,60	7,70	7,70	0,4	2,4	4,2
6	7,50	7,70	7,70	1,2	2,2	3,8
7	7,45	7,57	7,71	1,2	1,4	2,4
8	7,45	7,64	7,71	1,0	1,8	3,2
9	7,34	7,57	7,66	0,8	1,4	2,6
10	7,41	7,59	7,68	0,6	0,4	3,0
11	7,33	7,60	7,66	0,8	1,4	2,6
12	7,20	7,50	7,60	0,6	0,4	3,0
13	7,40	7,60	7,60	0,8	0,4	4,4
14	7,40	7,60	7,60	1,4	0,6	2,4
15	7,40	7,60	7,70	2,2	0,5	2,8
16	7,50	7,60	7,60	2,2	0,5	2,8
17	7,50	7,50	7,60	2,8	0,4	2,4
18	7,50	7,50	7,50	3,2	0,6	2,8
19	7,40	7,50	7,60	2,6	0,4	2,8
20	7,50	7,50	7,60	3,6	1,4	3,0
21	7,50	7,50	7,60	3,2	0,4	3,8
22	7,40	7,50	7,60	3,4	1,4	3,8
23	7,50	7,50	7,60	3,8	1,4	4,2
24	7,60	7,60	7,70	3,2	1,4	4,2

Tabla F8: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el segundo muestreo de la segunda etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	0,639	0,575	0,582
1	235	195	195	0,725	0,573	0,585
2	255	195	200	0,734	0,578	0,608
3	260	195	205	0,704	0,598	0,621
4	240	200	210	0,714	0,607	0,630
5	230	205	210	0,694	0,617	0,635
6	230	205	245	0,675	0,617	0,629
7	220	160	215	0,673	0,624	0,638
8	215	205	215	0,659	0,624	0,639
9	215	210	215	0,652	0,631	0,641
10	220	210	200	0,652	0,634	0,642
11	215	210	220	0,664	0,636	0,645
12	220	210	220	0,659	0,64	0,646
13	225	210	220	0,652	0,642	0,645
14	215	210	220	0,652	0,642	0,643
15	220	220	220	0,638	0,646	0,649
16	210	215	220	0,658	0,661	0,653
17	220	215	220	0,632	0,657	0,651
18	210	210	220	0,560	0,653	0,645
19	195	210	220	0,510	0,642	0,641
20	175	210	215	0,474	0,631	0,633
21	160	220	210	0,484	0,618	0,623
22	170	210	205	0,478	0,614	0,610
23	165	205	205	0,529	0,596	0,587
24	175	210	175	0,639	0,575	0,582



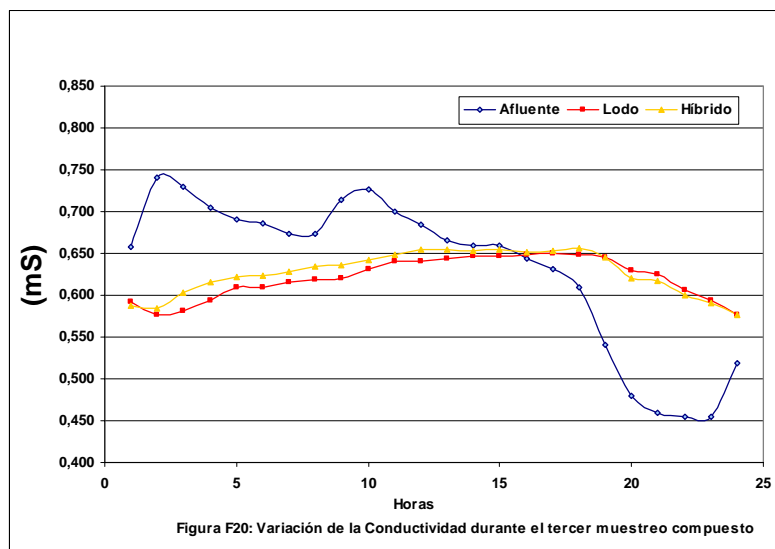
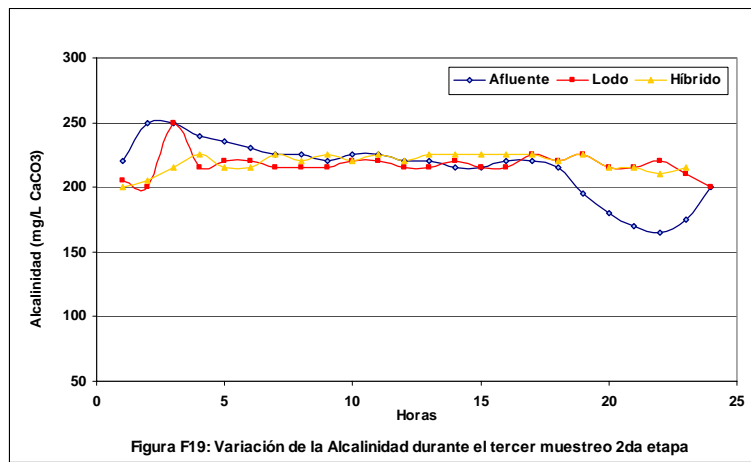
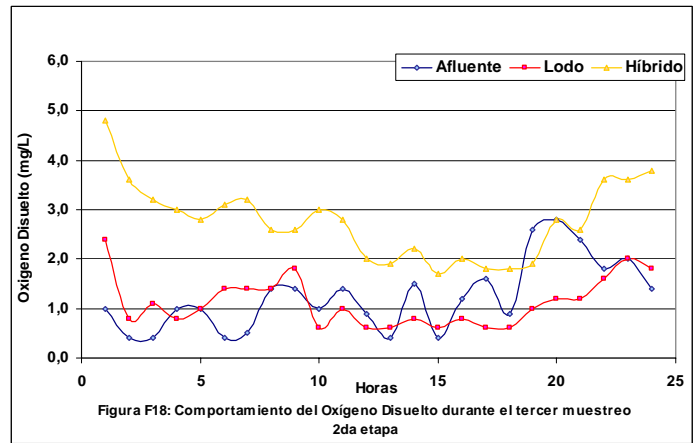
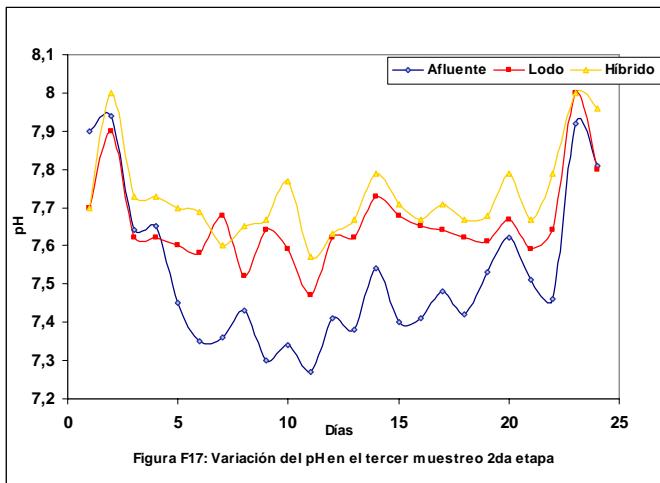
**Etapa 2:****Muestreo Compuesto 3:**

Tabla F9: Parámetros fisicoquímicos durante el tercer muestreo de la segunda etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	7,9	7,7	7,7	1,0	2,4	4,8
2	7,94	7,9	8	0,4	0,8	3,6
3	7,64	7,62	7,73	0,4	1,1	3,2
4	7,65	7,62	7,73	1,0	0,8	3,0
5	7,45	7,6	7,7	1,0	1,0	2,8
6	7,35	7,58	7,69	0,4	1,4	3,1
7	7,36	7,68	7,6	0,5	1,4	3,2
8	7,43	7,52	7,65	1,4	1,4	2,6
9	7,3	7,64	7,67	1,4	1,8	2,6
10	7,34	7,59	7,77	1,0	0,6	3,0
11	7,27	7,47	7,57	1,4	1,0	2,8
12	7,41	7,62	7,63	0,9	0,6	2,0
13	7,38	7,62	7,67	0,4	0,6	1,9
14	7,54	7,73	7,79	1,5	0,8	2,2
15	7,4	7,68	7,71	0,4	0,6	1,7
16	7,41	7,65	7,67	1,2	0,8	2,0
17	7,48	7,64	7,71	1,6	0,6	1,8
18	7,42	7,62	7,67	0,9	0,6	1,8
19	7,53	7,61	7,68	2,6	1,0	1,9
20	7,62	7,67	7,79	2,8	1,2	2,8
21	7,51	7,59	7,67	2,4	1,2	2,6
22	7,46	7,64	7,79	1,8	1,6	3,6
23	7,92	8,00	8,00	2,0	2,0	3,6
24	7,81	7,80	7,96	1,4	1,8	3,8

Tabla F10: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el tercer muestreo de la segunda etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	220	205	200	0,658	0,592	0,587
2	250	200	205	0,740	0,577	0,585
3	250	250	215	0,730	0,582	0,603
4	240	215	225	0,704	0,593	0,615
5	235	220	215	0,691	0,609	0,622
6	230	220	215	0,686	0,609	0,624
7	225	215	225	0,674	0,616	0,628
8	225	215	220	0,673	0,619	0,635
9	220	215	225	0,714	0,620	0,636
10	225	220	220	0,726	0,631	0,642
11	225	220	225	0,700	0,640	0,649
12	220	215	220	0,685	0,640	0,655
13	220	215	225	0,666	0,643	0,655
14	215	220	225	0,660	0,647	0,653
15	215	215	225	0,659	0,647	0,655
16	220	215	225	0,644	0,648	0,652
17	220	225	225	0,632	0,650	0,653
18	215	220	220	0,609	0,648	0,656
19	195	225	225	0,541	0,645	0,646
20	180	215	215	0,480	0,630	0,621
21	170	215	215	0,460	0,625	0,617
22	165	220	210	0,455	0,607	0,600
23	175	210	215	0,454	0,593	0,591
24	200	200	210	0,519	0,577	0,576





### Etapa 3: (Días 10, 11 y 12 de mayo)

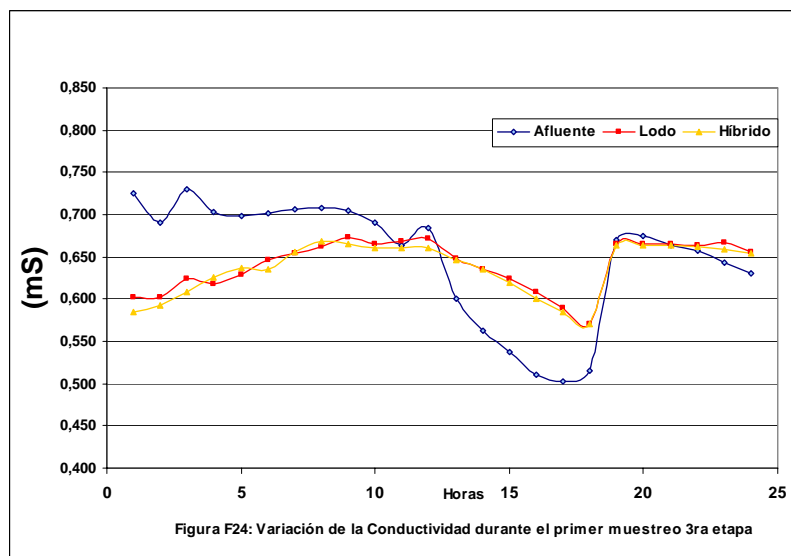
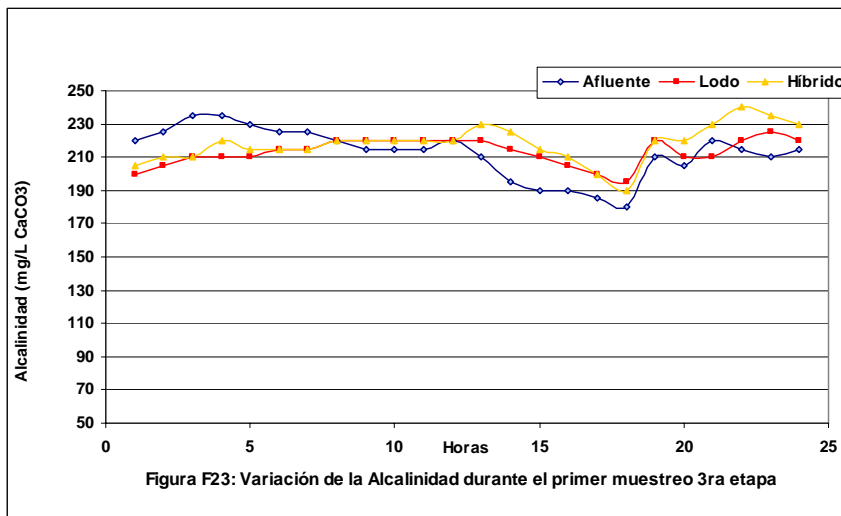
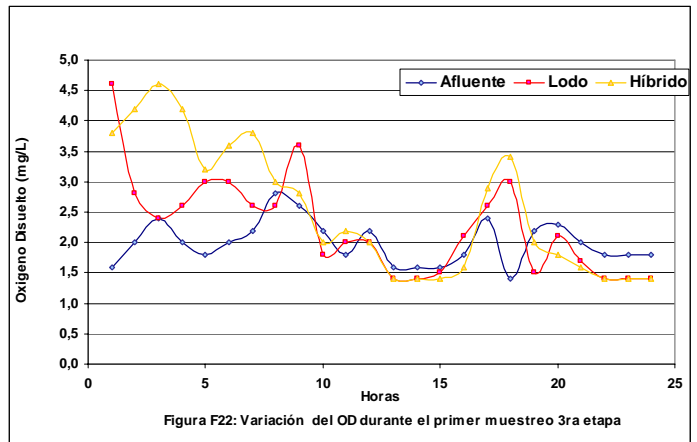
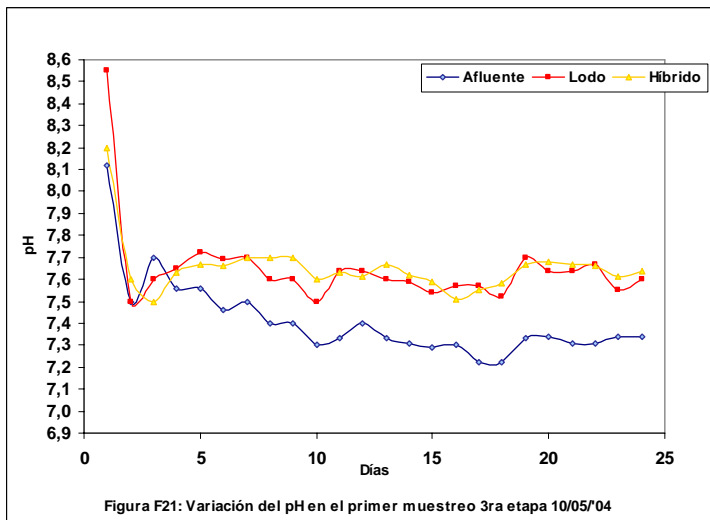
#### Muestreo Compuesto 1:

Tabla F11: Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la tercera etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	8,12	8,55	8,20	1,6	4,6	3,8
2	7,50	7,50	7,60	2,0	2,8	4,2
3	7,70	7,60	7,50	2,4	2,4	4,6
4	7,56	7,65	7,63	2,0	2,6	4,2
5	7,56	7,72	7,67	1,8	3,0	3,2
6	7,46	7,69	7,66	2,0	3,0	3,6
7	7,50	7,70	7,70	2,2	2,6	3,8
8	7,40	7,60	7,70	2,8	2,6	3,0
9	7,40	7,60	7,70	2,6	3,6	2,8
10	7,30	7,50	7,60	2,2	1,8	2,0
11	7,33	7,64	7,63	1,8	2,0	2,2
12	7,40	7,64	7,61	2,2	2,0	2,0
13	7,33	7,60	7,67	1,6	1,4	1,4
14	7,31	7,59	7,62	1,6	1,4	1,4
15	7,29	7,54	7,59	1,6	1,5	1,4
16	7,30	7,57	7,51	1,8	2,1	1,6
17	7,22	7,57	7,55	2,4	2,6	2,9
18	7,22	7,52	7,58	1,4	3,0	3,4
19	7,33	7,70	7,67	2,2	1,5	2,0
20	7,34	7,64	7,68	2,3	2,1	1,8
21	7,31	7,64	7,67	2,0	1,7	1,6
22	7,31	7,67	7,66	1,8	1,4	1,4
23	7,34	7,55	7,61	1,8	1,4	1,4
24	7,34	7,60	7,64	1,8	1,4	1,4

Tabla F12: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo de la tercera etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	220	200	205	0,725	0,602	0,585
2	225	205	210	0,691	0,602	0,593
3	235	210	210	0,730	0,625	0,608
4	235	210	220	0,703	0,618	0,626
5	230	210	215	0,698	0,629	0,637
6	225	215	215	0,702	0,647	0,635
7	225	215	215	0,706	0,655	0,656
8	220	220	220	0,708	0,662	0,668
9	215	220	220	0,704	0,673	0,665
10	215	220	220	0,690	0,665	0,660
11	215	220	220	0,664	0,669	0,660
12	220	220	220	0,684	0,672	0,661
13	210	220	230	0,600	0,648	0,646
14	195	215	225	0,563	0,636	0,635
15	190	210	215	0,538	0,624	0,620
16	190	205	210	0,511	0,608	0,600
17	185	200	200	0,503	0,589	0,585
18	180	195	190	0,515	0,570	0,571
19	210	220	220	0,670	0,666	0,663
20	205	210	220	0,674	0,666	0,663
21	220	210	230	0,663	0,665	0,664
22	215	220	240	0,658	0,663	0,662
23	210	225	235	0,643	0,667	0,659
24	215	220	230	0,630	0,656	0,654



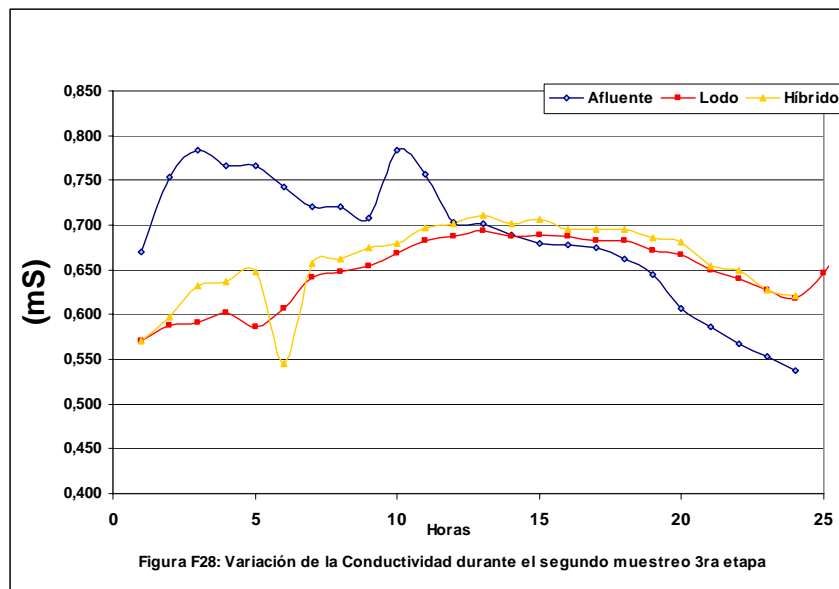
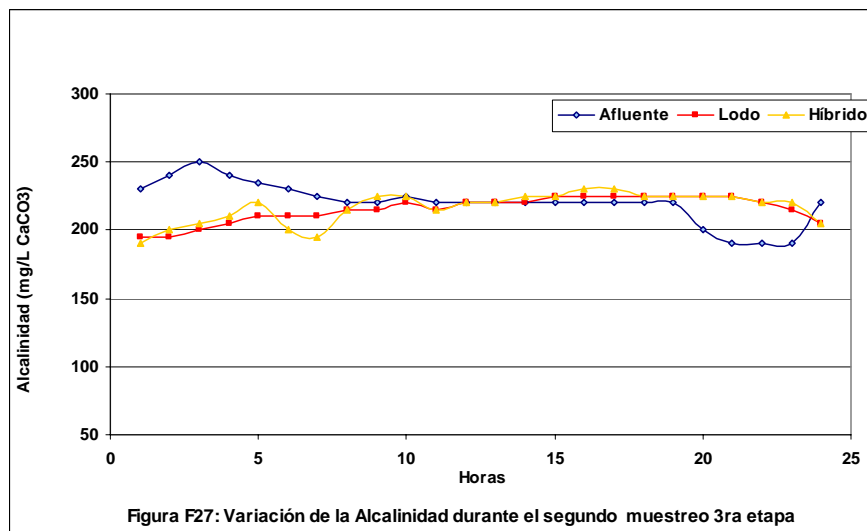
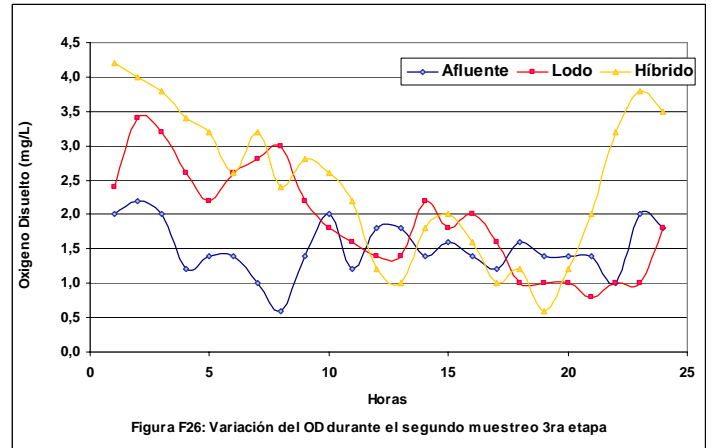
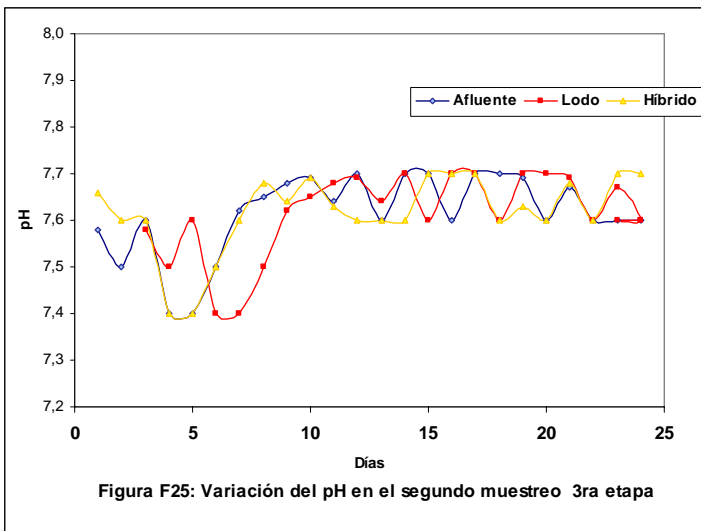
**Etapa 3:****Muestreo Compuesto 2:**

Tabla F13: Parámetros fisicoquímicos durante el segundo muestreo de la tercera etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	7,71	7,58	7,66	2,0	2,4	4,2
2	7,50	7,50	7,60	2,2	3,4	4,0
3	7,20	7,60	7,60	2,0	3,2	3,8
4	7,40	7,40	7,40	1,2	2,6	3,4
5	7,30	7,40	7,40	1,4	2,2	3,2
6	7,30	7,50	7,50	1,4	2,6	2,6
7	7,32	7,62	7,60	1,0	2,8	3,2
8	7,33	7,65	7,68	0,6	3,0	2,4
9	7,30	7,68	7,64	1,4	2,2	2,8
10	7,26	7,69	7,69	2,0	1,8	2,6
11	7,24	7,64	7,63	1,2	1,6	2,2
12	7,40	7,70	7,60	1,8	1,4	1,2
13	7,30	7,60	7,60	1,8	1,4	1,0
14	7,30	7,70	7,60	1,4	2,2	1,8
15	7,20	7,70	7,70	1,6	1,8	2,0
16	7,30	7,60	7,70	1,4	2,0	1,6
17	7,20	7,70	7,70	1,2	1,6	1,0
18	7,20	7,70	7,60	1,6	1,0	1,2
19	7,38	7,69	7,63	1,4	1,0	0,6
20	7,10	7,60	7,60	1,4	1,0	1,2
21	7,29	7,67	7,68	1,4	0,8	2,0
22	7,10	7,60	7,60	1,0	1,0	3,2
23	7,80	7,60	7,70	2,0	1,0	3,8
24	7,10	7,60	7,70	1,8	1,8	3,5

Tabla F14: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el segundo muestreo de la tercera etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	230	195	190	0,670	0,570	0,570
2	240	195	200	0,754	0,588	0,597
3	250	200	205	0,784	0,591	0,632
4	240	205	210	0,766	0,602	0,637
5	235	210	220	0,766	0,587	0,648
6	230	210	200	0,742	0,607	0,546
7	225	210	195	0,720	0,642	0,657
8	220	215	215	0,720	0,648	0,662
9	220	215	225	0,708	0,655	0,674
10	225	220	225	0,783	0,668	0,679
11	220	215	215	0,757	0,683	0,697
12	220	220	220	0,703	0,688	0,702
13	220	220	220	0,701	0,694	0,711
14	220	220	225	0,689	0,687	0,701
15	220	225	225	0,680	0,689	0,706
16	220	225	230	0,678	0,688	0,696
17	220	225	230	0,675	0,683	0,695
18	220	225	225	0,662	0,682	0,695
19	220	225	225	0,644	0,672	0,686
20	200	225	225	0,607	0,667	0,681
21	190	225	225	0,586	0,650	0,655
22	190	220	220	0,568	0,640	0,650
23	190	215	220	0,553	0,628	0,628
24	220	205	205	0,538	0,618	0,621



**Etapa 3:**  
**Muestreo Compuesto 3:**

Tabla F15: Parámetros fisicoquímicos durante el tercer muestreo de la tercera etapa

HORA	pH			OD		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	7,69	7,60	7,74	4,6	4,2	4,1
2	7,72	7,63	7,76	2,0	2,2	3,8
3	7,62	7,69	7,76	1,8	2,2	3,0
4	7,48	7,70	7,73	1,5	1,8	2,4
5	7,41	7,72	7,78	1,8	1,8	2,8
6	7,33	7,69	7,74	1,4	1,2	2,0
7	7,30	7,69	7,62	1,0	1,4	1,4
8	7,27	7,70	7,70	1,6	1,4	2,2
9	7,25	7,71	7,66	1,1	1,8	2,0
10	7,22	7,71	7,65	1,4	2,2	1,6
11	7,34	7,69	7,66	1,2	1,7	1,2
12	7,32	7,70	7,66	1,2	1,8	1,8
13	7,30	7,66	7,66	2,0	1,9	2,2
14	7,27	7,70	7,62	1,6	1,4	1,8
15	7,28	7,67	7,64	1,2	1,0	1,4
16	7,34	7,67	7,63	1,2	1,4	1,6
17	7,28	7,68	7,67	1,7	1,5	2,0
18	7,30	7,68	7,67	1,3	1,4	2,3
19	7,18	7,58	7,63	4,0	4,3	4,3
20	7,24	7,59	7,69	2,2	2,0	3,2
21	7,21	7,62	7,69	2,1	2,1	3,0
22	7,19	7,62	7,66	2,3	2,3	3,5
23	7,16	7,64	7,69	1,8	2,7	4,6
24	7,26	7,65	7,76	1,7	2,6	4,4

Tabla F16: (Continuación)  
 Parámetros fisicoquímicos durante el tercer muestreo de la tercera etapa

HORA	Alcalinidad			Conductividad		
	Afluente	Lodo	Híbrido	Afluente	Lodo	Híbrido
1	230	210	205	0,680	0,591	0,593
2	255	200	210	0,771	0,606	0,608
3	255	215	220	0,758	0,627	0,637
4	240	215	220	0,735	0,629	0,652
5	225	215	220	0,744	0,647	0,656
6	220	220	225	0,732	0,649	0,770
7	220	220	225	0,707	0,669	0,680
8	215	225	225	0,710	0,690	0,691
9	220	225	230	0,701	0,679	0,688
10	225	225	230	0,697	0,686	0,689
11	225	225	225	0,697	0,682	0,691
12	235	230	230	0,690	0,685	0,689
13	225	230	230	0,685	0,685	0,687
14	220	230	230	0,675	0,682	0,687
15	220	225	225	0,666	0,679	0,683
16	215	225	225	0,664	0,675	0,680
17	210	225	225	0,657	0,683	0,673
18	210	220	220	0,640	0,666	0,671
19	200	215	215	0,634	0,668	0,666
20	185	210	210	0,555	0,648	0,650
21	175	210	210	0,538	0,634	0,635
22	165	200	200	0,515	0,607	0,610
23	160	190	195	0,503	0,597	0,601
24	180	190	190	0,521	0,582	0,587



