

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LAGUNA FACULTATIVA. CASO ESTUDIO: LAGUNA FACULTATIVA DE LA PLANTA EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS, U.C.V.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
Ingeniero Químico
Por los Bres:
Colarusso O., Andrés J.
Rondón A., Rosalynn.

Caracas, Noviembre 2.006.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LAGUNA FACULTATIVA. CASO ESTUDIO: LAGUNA FACULTATIVA DE LA PLANTA EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS, U.C.V.

Tutores: Prof. López L., Eudoro E.

Profa. Rincones C., María E.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
Ingeniero Químico

Por los Bres:
Colarusso O., Andrés J.
Rondón A., Rosalynn.

Caracas, Noviembre 2.006.



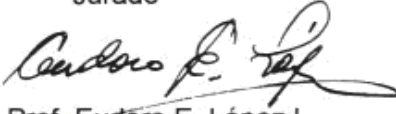
ACTA MENCIÓN HONORÍFICA


Los abajo firmantes, miembros del Jurado Examinador del Trabajo Especial de Grado “**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LAGUNA FACULTATIVA. CASO ESTUDIO: LAGUNA FACULTATIVA DE LA PLANTA EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS, U.C.V.**” presentado por los Bachilleres **Andrés J. Colarusso O.** y **Rosalynn Rondón A.**, 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 su aporte al conocimiento en la generación de una metodología para la evaluación del comportamiento de las lagunas de estabilización

En Caracas, a los veinte y dos días del mes de Noviembre del año dos mil seis


Prof. María V. Najul S.
Jurado


Prof. Henry A. Blanco S.
Jurado


Prof. Eudoro E. López L.
Tutor Académico


Prof. María E. Rincónes C.
Tutora Académica y Coordinadora del Jurado

Dedicatorias

Andrés...

A Dios y a la memoria de mis abuelos que ahora están junto a él:

Andrés Colarusso y Clara Díaz;

Jesús Oliveros y mi Bellísima María Josefina Raffezca.

A mis padres, que son mi bendición...

A mi esposa por su amor, paciencia, apoyo y comprensión.

A mi hijo que es lo más grande que me ha dado Dios.

...Rosalynn...

A Dios y al divino niño por señalarme el camino correcto.

A mi mamá, que es la persona que más admiro y quiero en el mundo.

A mi papá, a ese hombre trabajador que a pesar de la distancia siempre esta a mi lado.

A mis hermanas, quienes siempre han estado a mi lado apoyándome para salir adelante.

A mis sobrinos, que me han hecho ver la vida de otra manera, llena de risas y energía.

A Harry, esa persona que me ha dado mucha fuerza para seguir adelante.

Agradecimientos

Andrés y Rosalynn

En especial a la **Profa. María Rincones** y al **Prof. Eudoro López** por habernos concedido el privilegio de realizar nuestro Trabajo Especial de Grado bajo sus tutorías; por creer y confiar en nosotros; y por la disposición y apoyo incondicional durante la ejecución del proyecto.

Al Prof. José Hernández por su valiosa asesoría en el estudio hidráulico del reactor; y por el gran apoyo al asignarnos como pasante de investigación a la Sra. Omaira Garzón en tan laborioso trabajo.

A las personas que de una u otra forma brindaron su apoyo:

Prof. Henry Blanco. (E.I.C. - P.E.T.A)

Profa. María Najul. (E.I.C. - P.E.T.A)

Prof. Rosario Alberdi (E.I.C. - P.E.T.A)

Lic. Lynett Jones (Laboratorio Envirotec)

Prof. Amador Hernández (E.I.C. - Estación Meteorológica U.C.V.)

T.S.U. Alejandro Mata. (Técnico de Laboratorio - P.E.T.A)

T.S.U. Jesús Rosales. (Técnico de Planta. - P.E.T.A)

Sr. Jackson Tovar. (Personal de Planta - P.E.T.A)

Sr. Armando Martínez (Personal - E.I.Q. - L.O.U.)

Sra. Esperanza Romero (Secretaria – P.E.T.A)

Sr. Cristian Romero (Personal de Laboratorio - P.E.T.A)

Agradecimientos

Andrés...

A Dios...

A las personas que prestaron apoyo moral:

Lorenzo Colarusso y Martha de Colarusso (Mis Padres)

Raiza Mejias y Andrés Lorenzo (Mi Esposa e Hijo)

A las personas que brindaron su mano cuando más se necesitó; estaré siempre agradecido por sus compañías en las largas noches de muestreos:

Rodrigo Parra (Est.E.I.G.M.G.- U.C.V.)

Iván Rubio (Universidad Francisco de Paula Santander – Colombia)

Mary Liliana Díaz (Universidad Francisco de Paula Santander – Colombia)

Omaira Garzon (Pasante de Investigación, Est.E.I.Q.-U.C.V.)

Rosalynn...

A Dios y al Divino Niño por guiarme en todo momento.

A mi madre Elba Araujo por estar siempre allí y saber que cuento con ella en todo momento Gracias.

A mi padre Gerardo Rondón por el apoyo desde el momento que decidí emprender este camino.

A Harry Guevara mil gracias por estar en las buenas y en las malas, te amo mucho y gracias por la compañía a lo largo de la realización de este trabajo.

A mis hermanas Yndira y Elba Rondón por estar a mi lado siempre las quiero mucho.

A mis sobrinos Jesús M., Yndira P. y Manuel A. por brindarme la alegría en los mejores momentos de mi vida

A Leidy López mi nietis gracias por la amistad incondicional. Y por el apoyo a lo largo de la carrera

A Javier Guillen, Scarlett A., Jackson T. y Jesús R. por la ayuda prestada a lo largo de este trabajo

En estas ocasiones a veces la memoria nos falla. A todos aquellos que no mencionamos pero que ayudaron de una u otra forma a la conclusión de esta tesis.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LAGUNA
FACULTATIVA. CASO ESTUDIO: LAGUNA FACULTATIVA DE LA PLANTA
EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUA, U.C.V.**

**Colarusso O., Andrés J.
Rondón A., Rosalynn.**

**Tutores Académicos: Prof. López L., Eudoro E; Rincones C., María E.
Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2.006.
209 pgs.**

Palabras Claves: Laguna de estabilización facultativa, hidráulica, nutrientes, material orgánico carbonáceo y balance hídrico.

RESUMEN

El objeto de este Trabajo Especial de Grado consistió en la caracterización del comportamiento de una laguna de estabilización facultativa a escala piloto, ubicada en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la U.C.V. y usada para el tratamiento de aguas residuales de origen municipal. Se estudiaron los factores de influencia en la eficiencia en términos de remoción de materia orgánica carbonácea y los nutrientes fósforo y nitrógeno, para tres cargas hidráulicas operadas, 2,0; 4,5; y 6,5 MLD/ha.

El estudio de las variables físico-químicas: oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, conductividad y temperatura, resultaron constantes a lo largo del sistema, mientras que a diferentes profundidades se presentaron, variaciones que responden a factores microbiológicos e hidráulicos. Se demostró la estabilidad físico-química de la laguna para las tres cargas operadas. La laguna operó en condiciones facultativas durante el día, con mayor concentración de oxígeno disuelto en la zona eufótica, y por la noche operó en condición anaerobia.

El estudio hidráulico determinó la presencia de flujo transitorio en el volumen de la laguna, debido a un comportamiento estratificado durante el día y mezclado homogéneo por la noche; presencia de cortocircuito y recirculación. Así mismo, se demostró que los parámetros obtenidos a partir de la curva C, y la curva F, no aplican al sistema en estudio,

para las cargas operadas; y que las condiciones del modelo de dispersión de Levenspiel no se cumplen.

Bajo condiciones ideales se demostró que la laguna no presenta infiltraciones.

Se realizó el balance hídrico considerando el tiempo de retención, para garantizar la perturbación de parámetros meteorológicos en la laguna, resultando que la precipitación y evaporación no son significativas frente a los caudales operados, 10, 22 y 32 l/min correspondientes a las cargas hidráulicas, 2,0; 4,5; y 6,5 MLD/ha respectivamente, manteniéndose el caudal afluente igual al caudal efluente. Las variables anteriores no afectan la estabilidad físico-química del sistema. Sin embargo, fuertes precipitaciones causan dilución en el afluente y tiene como consecuencia la alteración de los resultados de porcentaje de remoción respecto a la $DBO_{5,20}$.

En el estudio de concentración de fitoplancton hubo presencia de los géneros flagelados *Euglena sp.*, *Pyrobotrys sp.* y *Chlamydomonas sp.* Así mismo, se demostró que el incremento de la carga hidráulica de 2,0 a 4,5 MLD/ha reduce la concentración de la biomasa algal debido a: menor tiempo de retención para su reproducción; menor profundidad eufótica para demandar energía; y mayor carga orgánica, lo que reduce su biodiversidad; y tiene como consecuencia una reducción significativa de la remoción de nitrógeno total, 23% (promedio) para la carga de 2,0 MLD/ha y 8% (promedio) para la carga 4,5 MLD/ha.

Bajo las condiciones descritas anteriormente la laguna presentó: un porcentaje de remoción promedio, respecto a la $DBO_{5,20}$ considerando salida total, de 52%, 46% y 33% para las cargas 231 Kg $DBO/ha.d$ (2,0 MLD/ha), 306 Kg $DBO/ha.d$ (4,5 MLD/ha) y 569 Kg $DBO/ha.d$ (6,5 MLD/ha) respectivamente. Mientras que el porcentaje de remoción promedio, respecto a la $DBO_{5,20}$ considerando salida soluble, 87%, 78% y 77% para las cargas 231, 306 y 569 Kg $DBO/ha.d$ respectivamente.

La radiación solar es el factor meteorológico de mayor influencia en el sistema. Su presencia y variación en el tiempo promueve los cambios hidráulicos, físico-químicos y biológicos en el volumen de agua.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	xv
INDICE DE TABLAS	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
OBJETIVOS.....	5
General:	5
Específicos:	5
CAPITULO I.....	7
I.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
I.1. Parámetros que Caracterizan el Comportamiento Hidráulico de un Sistema.....	8
I.1.1. Distribución de Tiempo de Residencia del Fluido.....	8
I.1.2.- Medición de la DTR	9
I.1.2.1. Inyección por Pulso	9
I.1.2.2. Relación entre la Curva C y la Curva F	11
I.1.3.- Determinación del Patrón de Flujo	11
I.1.3.1.- Tiempo de retención teórico	12
I.1.3.2.- Flujo no ideal o disperso.....	12
I.1.3.3.- Flujo Mezcla Completa	12
I.1.3.4.- Flujo Pistón.....	13
I.1.3.5.- Volumen Muerto.....	14
I.1.3.6.- Cortocircuito	15
I.1.4.- Fórmulas para la Función F(t) Según el Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf-Resnick	15
I.1.4.1.- Definiciones Básicas.....	15
I.1.4.2.- Aplicando la Teoría de Wolf y Resnick	17
I.1.4.3.- Resumen de Fórmulas	18
I.1.5.- Fórmulas Básicas para la Función C(t), Desarrolladas por Mangelson y George, 1.973	18
I.1.5.1.- Tiempo de Retención Adimensional	18
I.1.5.2.- Volumen Muerto.....	19
I.1.5.3.- Desviación Respecto del Flujo Pistón	19
I.1.6.- Modelo de Dispersión Axial, Desarrolladas por Levenspiel y Smith 1.957....	20
I.1.6.1.- Definiciones Básicas.....	20
I.1.6.2.- Análisis para Frontera Cerrada	21

I.1.6.3.- Consideraciones del Modelo	22
I.2.- Parámetros Hídricos	23
I.2.1.- Balance de Hídrico.....	23
I.3.- Parámetros Físico-Químicos.....	23
I.3.1.- Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	23
I.3.2.- Demanda Química de Oxígeno.....	24
I.3.3.- Oxígeno Disuelto	24
I.3.4.- pH.....	26
I.3.5.- Sólidos	27
I.3.6.- Nutrientes.....	28
I.3.6.1.- Nitrógeno.....	29
I.3.6.2.- El Fósforo	30
I.4.- Parámetros Meteorológicos.....	32
I.4.1.- Acción de los Vientos	32
I.4.2.- Temperatura	33
I.4.3.- Precipitaciones Pluviales	35
I.4.4.- Radiación solar.....	36
I.4.5.- Evaporación	37
I.5.- Biología del Proceso.	37
I.5.1.- Las Algas como Factor de Influencia en una Laguna de Estabilización.	39
I.5.2.- Fotosíntesis y Respiración.....	39
I.5.3.- Nutrientes - Algas.....	42
I.5.4.- Biomasa de las Algas.....	43
I.5.5.- Estratificación de las algas en lagunas de estabilización.....	44
 CAPITULO II.....	 47
II.- ANTECEDENTES.....	47
II.1.- Características del Afluente	47
II.2.- Características del Efluente.....	48
II.3.- Experiencias Previas en Laguna Facultativa.....	49
II.3.1.- Ramírez y Regardiz.....	49
II.3.2.- Espinoza	51
II.3.3.- Figueroa C. y Paz F.....	54
II.3.4.- Kwong Ch., Elsa y colaboradores	56
II.3.5.- Vargas, Luís y Colaboradores	57
 CAPITULO III	 59
III.- METODOLOGÍA	59
III.1.- Condiciones de Operación.....	61
III.2.- Estabilidad de la Laguna	61

III.3.- Determinación de Parámetros Hidráulicos en la Laguna	62
III.3.1.- Ubicación de la Inyección, Detección y Medición del Trazador	62
III.3.2.- Perfil de Flujo dentro de la Laguna.	63
III.4.- Parámetros Físico-Químicos.	65
III.4.1.- Parámetros Físico-Químicos de la Laguna Facultativa.	65
III.4.2. Distribución Espacial a lo Largo de la Laguna Facultativa	66
III.5. Parámetros Meteorológicos	68
III.6. Determinación de Clorofila “a”.	68
 CAPITULO IV	 70
IV.- RESULTADOS Y ANALISIS	70
IV.1.- Primera Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.	70
IV.1.1.- Análisis Hidráulico.	70
IV.1.2.- Concentración de Fitoplancton.	70
IV.1.3.- Parámetros físico-químicos.	81
IV.1.4.- Balance Hídrico	85
IV.1.5.- Parámetros Meteorológicos.	86
IV.2.- Segunda Carga Hidráulica 4,5 MLD/ha.	87
IV.2.1.- Análisis Hidráulico.	87
IV.2.2.- Concentración de Fitoplancton	92
IV.2.3.- Parámetros físico-químicos.	96
IV.2.4.- Balance Hídrico	100
IV.2.5.- Parámetros Meteorológicos.	101
IV.3.- Tercera Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha.	106
IV.3.1.- Análisis Hidráulico.	106
IV.3.2.- Parámetros físico-químicos.	109
IV.3.4.- Parámetros Meteorológicos.	115
IV.4.- Estudio comparativo entre las cargas	117
 CONCLUSIONES.....	 123
 RECOMENDACIONES	 123
 BIBLIOGRAFÍA	 129
 APÉNDICE A	 134
A I.- Caudales de operación	134
A II.- Cálculo tipo para el primer caudal de operación	134
 APÉNDICE B.....	 137
B I.- Cálculos previos para la determinación de infiltraciones y/o percolaciones.	137

B II.- Evaporación por secado superficial.....	138
B III.- Cálculo tipo de la evaporación por secado superficial.....	139
B IV.- Cálculo tipo del balance hídrico para la determinar infiltraciones.	139
B V.- Cálculo tipo del precipitación y evaporación.....	139
B VI.-Cálculo tipo del balance hídrico para el tiempo de retención del sistema.	139
APÉNDICE C.....	148
C I.- Velocidades de flujo dentro de la laguna.....	148
APÉNDICE D	151
D I.- Resultados del estudio hidráulico para el muestreo discreto	151
D I.1.- Primera Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.	151
D I.2.- Segunda Carga Hidráulica 4,5 MLD/ha.	155
D I.3.- Tercera Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha.....	159
D II.- Resultados del estudio hidráulico para el muestreo Continuo	163
D II.1.- Primera Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.....	163
D II.2.- Segunda Carga Hidráulica 4,5 MLD/ha.....	163
D II.3.- Tercera Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha.	164
APÉNDICE E.....	165
E.I.- Parámetros Físico-Químicos In Situ de la laguna facultativa. Antes de la estabilidad de la primera carga de operación.....	165
E.II.- Resultados Físico-químicos “in situ” a lo largo y profundo de la laguna.....	167
E.II.1.- Primera carga operada 231 Kg DBO/ha.d (2,0 MLD/ha).	167
E.II.2.- Segunda carga operada 306 Kg DBO/ha.d (4,5 MLD/ha).	175
E.II.3.- Tercera carga operada 569 Kg DBO/ ha.d (6,5 MLD/ha).....	182
E.III. Parámetros físico-químicos obtenidos en el laboratorio	190
E.III.1.- Primera carga operada 233 Kg DBO/ ha.d (2,0 MLD/ha)	190
E.III.2.-Segunda carga operada 306 Kg DBO/ ha.d (4,5 MLD/ha).....	195
E.III.3.- Tercera carga operada 569 Kg DBO/ ha.d (6,5 MLD/ha).....	200
APENDICE F	205
F.1.- Relación entre los parámetros Físico-Químico y Meteorológico.....	205
APENDICE G	209
G.1.- Cálculo de la masa aproximada de trazador retenida en la laguna	209



INDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Ecosistemas de una laguna facultativas.....	8
Figura I.2. Curvas típicas para el estudio de la DTR en las unidades de proceso.....	10
Figura I.3. Flujo mezcla completa..	10
Figura I.4. Flujo pistón.....	14
Figura I.5. Tipo de flujo no ideal que pueden presentar las unidades de proceso.....	15
Figura I.6. Diagrama concentración – tiempo para flujo pistón y mezclado.	15
Figura I.7- Curvas de respuesta de un trazador para reactores cerrados y grandes desviaciones respecto del pistón.....	22
Figura I.8. Variaciones horario de oxígeno disuelto en las diferentes profundidades de una laguna facultativa con profundidad útil de 1,2 metros.....	27
Figura I.9.- Ciclo del Nitrógeno.....	29
Figura I.10.- Variación horario de la temperatura a diferentes profundidades de una laguna facultativa (profundidad útil: 1,20 m).	34
Figura I.11.- Ciclo simbólico fotosintético en lagunas de estabilización.....	41
Figura III.1. Laguna Facultativa de la P.E.T.A.	62
Figura III.2. Distribución espacial de los puntos de muestreo para el análisis discreto del trazador dentro de la laguna.	64
Figura III.3a. Distribución Espacial a lo Largo de la Laguna. Vista Plano en la Dirección del Flujo.....	66
Figura III.3b. Distribución Espacial a lo Profundo de la Laguna. Vista Longitudinal en la Dirección del Flujo.....	67
Figura III.4. Captador de Muestra de la laguna a 0,18m, 0,54m y 1m de Profundidad.	67
Figura IV.1. Representación tridimensional de los puntos de muestreo en la laguna para el muestreo discreto de trazador.....	70
Figura IV.2. Esquema longitudinal central de los puntos de muestreo dentro de la laguna.....	71
Figura IV.3. Curva C. Distribución de Tiempo de Residencia de la Laguna Facultativa de la P.E.T.A.-U.CV. Para una Carga Hidráulica de 2,0 MLD/ha.	75

Figura IV.4. Porcentajes promedio de aparición de géneros de algas para una carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d en la laguna facultativa. Adoptada de Díaz y Rubio (2.006).	79
Figura IV.5. Influencia de radiación solar en la variación horaria de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Carga Orgánica 231 Kg DBO/ha.d. Fecha: 25/05/06.	86
Figura IV.6. Curva C. Distribución de Tiempo de Residencia de la Laguna Facultativa de la P.E.T.A.-U.CV. Para una Carga Hidráulica de 4,5 MLD/ha.	90
Figura IV.7. Resuspensión de sólidos, teñidos de rodamina WT, debido a una perturbación aplicada en la columna de agua.	91
Figura IV.8. Porcentajes promedio de aparición de géneros de algas para una carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d en la laguna facultativa. Adoptada de Díaz y Rubio (2.0006).	94
Figura IV.9. Influencia de radiación solar en la variación horaria de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Carga Orgánica 306 KgDBO/ha.d. Fecha: 19/08/06.	102
Figura IV.10. Influencia de radiación solar en la variación horaria de temperatura en diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga Orgánica 306 Kg DBO/ha.d. Fecha: 19/08/06.	103
Figura IV.11. Curva C. Distribución de Tiempo de Residencia de la Laguna Facultativa de la P.E.T.A.-U.CV. Para una Carga Hidráulica de 6,5 MLD/ha.	108
Figura IV.12. Influencia de radiación solar en la variación horaria de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Carga Orgánica 569 KgDBO/ha.d. Fecha: 07/09/06.	115
Figura IV.13. Influencia de radiación solar en la variación horaria de temperatura en diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga Orgánica 569 Kg DBO/ha.d. Fecha: 07/09/06.	116
Figura A.1. Bosquejo Representativo de la Canal de Aproximación en el Distribuidor de Flujo de P.E.T.A.-U.C.V.	135
Figura D 2. (a) Representación gráfica del perfil longitudinal izquierdo de la laguna en sentido entrada-salida. (b) Esquema longitudinal de los puntos que permiten la descripción y análisis del sistema.	152
Figura D 4. Curva 1-F para una Carga Hidráulica de 2,0 MLD/ha.	163
Figura D 5. Curva 1-F para una Carga Hidráulica de 4,5 MLD/ha.	163
Figura D 6. Curva 1-F para una Carga Hidráulica de 6,5 MLD/ha.	164

INDICE DE TABLAS

Tabla II.1. Resumen de los Análisis Físico-Químicos	48
Tabla II.2. Parámetros Físico-Químicos del Efluente	49
Tabla II.3a. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a partir de la Curva C para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.....	50
Tabla II.3b. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva F para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.....	51
Tabla II.4a. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva C para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.....	52
Tabla II.4b. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva F para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.....	53
Tabla II.5a. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a partir de la Curva C para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.....	55
Tabla II.5b. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva F para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.....	56
Tabla II.6. Valores promedio de temperatura para algunas progresivas en los diferentes niveles de la laguna según incidencia solar.....	57
Tabla III.1. Condiciones de operación aplicadas en la laguna facultativa	60
Tabla III.2a. Parámetros que se Obtienen a partir de la Curva C	63
Tabla III.2.b. Parámetros que se Obtienen a partir de la Curva F	63
Tabla III.3. Análisis Físico-Químicos	65
Tabla III.4. Parámetros Meteorológicos y Dispositivos a Utilizar	68
Tabla III.5. Profundidades establecidas para cada carga.....	69
Tabla IV.1. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min después de la inyección del trazador.....	71
Tabla IV.2. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección del trazador.....	72

Tabla IV.3. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador.....	73
Tabla IV.4. Parámetros Hidráulicos. Carga hidráulica 2,0 MLD/ha.....	74
Tabla IV.5. Máximos característicos de la DTR para la carga hidráulica de 2,0 MLD/ha.	76
Tabla IV.6. Promedios de clorofila “a” y parámetros físico-químicos a diferentes profundidades en la laguna facultativa. Carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d.	77
Tabla IV.7. Remoción de Nitrógeno y Ortofosfatos Solubles, para una carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d. Fecha 25 de mayo de 2.006.....	80
Tabla IV.8. Parámetros físico-químicos promedio a diferentes profundidades para los tres muestreos en la laguna facultativa. Carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d.	82
Tabla IV.9. Comparación de la remoción de DBO considerando el tiempo de retención y sin considerarlo. Carga orgánica 231 Kg DBO/ha.d.....	83
Tabla IV.10. Análisis físico-químicos para la carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d.....	84
Tabla IV.11. Comparación del Balance hídrico con la remoción de DBO, considerando el tiempo de retención del sistema para la Carga orgánica 231 Kg DBO/ha.d.	85
Tabla IV.12. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min., después de la inyección del trazador.	87
Tabla IV.13. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador.	88
Tabla IV.14. Parámetros Hidráulicos. Carga hidráulica 4,5 MLD/ha.....	89
Tabla IV.15. Máximos característicos de la DTR para la carga hidráulica de 4,5 MLD/ha.	90
Tabla IV.16 Promedios de clorofila “a” y parámetros físico-químicos a diferentes profundidades en la laguna facultativa. Carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d.....	92
Tabla IV.17. Remoción de Nitrógeno y Ortofosfatos Solubles, para una carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d. Fecha 15 de agosto de 2.006.....	95
Tabla IV.18. Parámetros físico-químicos promedios a diferentes profundidades para los tres muestreos en la laguna facultativa. Carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d.	97
Tabla IV.19. Comparación de la remoción de DBO considerando el tiempo de retención y sin considerarlo. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.....	98

Tabla IV.20. Resultados de los análisis físico-químicos para la carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d. 99	99
Tabla IV.21. Comparación del Balance hídrico con la remoción de DBO, considerando el tiempo de retención del sistema para la carga hidráulica de 4,5 MLD/ha.....	100
Tabla IV.22. Distribución de la DBO _{5,20} , O.D. y temperatura en muestras instantáneas. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.....	104
Tabla IV.23. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min., después de la inyección del trazador.	106
Tabla IV.24. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador.	107
Tabla IV.25. Parámetros Hidráulicos. Carga hidráulica 6,5 MLD/ha.....	107
Tabla IV.26. Máximos característicos de la DTR para la carga hidráulica de 6,5 MLD/ha.	108
Tabla IV.27. Remoción promedio de nitrógeno y fósforo, para una carga orgánica de 569 Kg DBO/ha.d.	109
Tabla IV.28. Parámetros físico-químicos promedio a diferentes profundidades en la laguna facultativa. Carga orgánica de 569 Kg DBO / ha d.....	111
Tabla IV.29. Comparación de la remoción de DBO considerando el tiempo de retención y sin considerarlo. Carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d.....	112
Tabla IV.30. Análisis físico-químicos para la carga orgánica de 569 DBO/ha.d.....	113
Tabla IV.31. Comparación del Balance hídrico con la remoción de DBO, considerando el tiempo de retención del sistema para la carga hidráulica de 6,5 MLD/ha.....	114
Tabla IV.32. Distribución de la DBO _{5,20} , O.D. y temperatura en muestras instantáneas. Carga Orgánica 569 Kg DBO/ha.d.	117
Tabla IV.33. Variables comparativas para las tres cargas de operación.	118
Tabla IV.34. Comparación de la remoción de nitrógeno y ortofosfato soluble para las tres cargas de operación.	119
Tabla IV.35. Comparación de los análisis físico-químicos con la normativa venezolana vigente.	122
Tabla A 1. Variación de la DBO del afluente en el tiempo.....	134
Tabla B 1. Condiciones meteorológicas promedio para un periodo entre las 8 p.m. y 8 a.m.	137

Tabla B 2. Medición del caudal afluente y efluente de la laguna facultativa para la carga hidráulica 2,0 MLD/ ha.....	144
Tabla B 3. Balance hídrico para el tiempo de retención del sistema.Carga hidráulica 2,0 MLD/ha.	146
Tabla B 4. Balance hídrico para el tiempo de retención del sistema.Carga hidráulica 4,5 MLD/ha.	146
Tabla B 5. Balance hídrico para el tiempo de retención del sistema.Carga hidráulica 6,5 MLD/ha.	147
Tabla C.1. Razón de velocidades entre el afluente y la masa de agua en la laguna para las diferentes cargas hidráulicas de operación del sistema.	150
Tabla D 1. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min después de la inyección.	152
Tabla D 2. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.....	153
Tabla D 3. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.....	153
Tabla D 4. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.	153
Tabla D 5. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	154
Tabla D 6. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	154
Tabla D 7. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.	154
Tabla D 8 Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.....	155
Tabla D 9. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.	155
Tabla D 10. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.	156
Tabla D 11. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.....	156
Tabla D 12. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.	156

Tabla D 13. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	157
Tabla D 14. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	157
Tabla D 15. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	157
Tabla D 16. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.....	158
Tabla D 17. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.....	158
Tabla D 18. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.....	159
Tabla D 19. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.....	159
Tabla D 20. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30min. después de la inyección.....	160
Tabla D 21. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 30min después de la inyección.....	160
Tabla D 22. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	161
Tabla D 23. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	161
Tabla D 24. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.....	161
Tabla D 25. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.....	162
Tabla D 26. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.....	162
Tabla D 27. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.....	162
Tabla E 1. Parámetros Físico-Químicos de la Laguna Facultativa P.E.T.A. 30/03/2006	165

Tabla E 2. Perfil de Temperaturas de la Laguna Facultativa P.E.T.A. 30/04/2006	166
Tabla N° E.3.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d.(25/05/2006 8:00a.m)	167
Tabla N° E.3.b.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006 2:00p.m)	168
Tabla N° E.3.c.-Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006 8:00p.m)	168
Tabla N° E.3.d.-Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006 2:00a.m)	169
Tabla N° E.3.e.-Condiciones meteorológicas para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006)	169
Tabla N° E.4.a.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 8:00a.m)	170
Tabla N° E.4.b.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 2:00p.m)	170
Tabla N° E.4.c.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 8:00p.m)	171
Tabla N° E.4.d Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 2:00a.m)	171
Tabla N° E.4.e Condiciones meteorológicas para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006) (Continuación).....	172
Tabla N° E.5.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 8:00a.m)	172
Tabla N° E.5.b Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 2:00p.m)	173
Tabla N° E.5.c Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 8:00p.m)	173
Tabla N° E.5.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 2:00a.m)	174
Tabla N° E.5.e Condiciones meteorológicas para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006).....	174
Tabla N° E.6.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 8:00a.m)	175

Tabla N° E.6.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 2:00p.m)	175
Tabla N° E.6.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 8:00p.m)	176
Tabla N° E.6.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 2:00a.m)	176
Tabla N° E.6.e. Condiciones meteorológicas para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006).....	177
Tabla N° E.7.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006 8:00a.m)	177
Tabla N° E.7.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d.(15/08/2006 2:00p.m)	178
Tabla N° E.7.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006 8:00p.m)	178
Tabla N° E.7.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006 2:00a.m)	179
Tabla N° E.7.e. Condiciones meteorológicas para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006)	179
Tabla N° E.8.a Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 8:00a.m)	180
Tabla N° E.8.b Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 2:00p.m)	180
Tabla N° E.8.c Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 8:00p.m)	181
Tabla N° E.8.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 2:00a.m)	181
Tabla N° E.8.e Condiciones meteorológicas para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006).....	182
Tabla N° E.9.a Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 8:00a.m)	182
Tabla N° E.9.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 2:00p.m)	183
Tabla N° E.9.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 8:00p.m)	183

Tabla N° E.9.d Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 2:00a.m)	184
Tabla N° E.9.e. Condiciones meteorológicas para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006).....	184
Tabla N° E.10.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 8:00a.m)	185
Tabla N° E.10.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 2:00p.m)	185
Tabla N° E.10.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 8:00p.m)	186
Tabla N° E.10.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 2:00a.m)	186
Tabla N° E.10.e. Condiciones meteorológicas para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006).....	187
Tabla N° E.11.a Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 8:00a.m)	187
Tabla N° E.11.b Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 2:00p.m)	188
Tabla N° E.11.c Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 8:00p.m)	188
Tabla N° E.11.d Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 2:00a.m)	189
Tabla N° E.11.e Condiciones meteorológicas para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006).....	189
Tabla N° E.12. Condiciones de estabilidad para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)	190
Tabla N° E.13 Porcentaje de remoción en términos de DBO para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)	190
Tabla N° E.14 Porcentaje de remoción en términos de DQO para la carga orgánica 233 (Kg DBO/ ha.d)	191
Tabla N° E.15 Sólidos en todas sus formas para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d).....	191
Tabla N° E.16 Registro de temperatura para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d).....	192
Tabla N° E.17 Porcentaje de remoción del nitrógeno Kjeldahl para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)	193

Tabla N° E.18 Porcentaje de Remoción del fósforo para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ha.d) ...	193
Tabla N° E.19 Porcentaje de Remoción de nitratos para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ha.d)....	193
Tabla N° E.20 Porcentaje de remoción de nitritos para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ha.d).....	194
Tabla N° E.21 Condiciones de estabilidad carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)	195
Tabla N° E.22 Porcentaje de remoción en términos de DBO para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)	195
Tabla N° E.23 Porcentaje de remoción en términos de DQO para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)	196
Tabla N° E.24 Sólidos en todas sus formas para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)	196
Tabla N° E.25 Registro de temperatura para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)	197
Tabla N° E.26 Porcentaje de remoción del nitrógeno Kjeldahl para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d). Considerando tiempo de retención.	198
Tabla N° E.27 Porcentaje de remoción del fósforo para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ha.d)	198
Tabla N° E.28 Porcentaje de remoción de nitratos para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ha.d)	198
Tabla N° E.29 Porcentaje de remoción de nitritos para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ha.d).....	199
Tabla N° E.30 Condiciones de estabilidad para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)	200
Tabla N° E.31 Porcentaje de remoción en términos de DBO para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)	200
Tabla N° E.32 Porcentaje de remoción en términos de DQO para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha*d)	200
Tabla N° E.33 Sólidos en todas sus formas para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)	201
Tabla N° E.34 Registro de temperatura para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)	202
Tabla N° E.35 Porcentaje de remoción del nitrógeno total kjeldahl para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d). Considerando el tiempo de retención.	203
Tabla N° ° E.36 Porcentaje de remoción del fósforo para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d) .	203
Tabla N° ° E.37 Porcentaje de remoción de nitratos para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)..	203
Tabla N° ° E.38.- Porcentaje de remoción de nitritos para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ha.d) .	204

Tabla N° F.1 Variación horario de oxígeno disuelta a diferentes profundidades y la radiación solar. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.	205
Tabla N° F.2. Variación horaria de la temperatura a diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.	206
Tabla N° F.3 Variación horario de oxígeno disuelta a diferentes profundidades y la radiación solar. Carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d.	207
Tabla N° F.4.- Variación horario de la temperatura a diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d.	208

INTRODUCCIÓN

El hombre ha hecho esfuerzos para captar y tratar las aguas residuales. Si bien la captación y drenaje de aguas pluviales vienen de tiempos antiguos, la recolección de aguas residuales no surge sino a principio del siglo XIX y el tratamiento sistemático de éstas sólo se inicia a finales del siglo XX, menos del 14% de los 600 m³/s de aguas residuales colectadas en América Latina recibían algún tratamiento antes de ser dispuestas en ríos y mares. De ellas, sólo un 6% recibían un tratamiento aceptable. (Márquez, 2004)

En Venezuela, un gran porcentaje de la población es urbana y la mayoría de los centros poblados no cuentan con sistemas de tratamiento y disposición de las aguas servidas. Por lo tanto, la contaminación de los ríos tiene su origen en los efluentes residuales de dichas zonas, así como también en desechos industriales causantes de un alto grado de contaminación por no disponer de un sistema de tratamiento o no cumplir con las normas vigentes.

En consecuencia, el manejo de las aguas residuales se ha convertido en una de las problemáticas de mayor complejidad que tienen que resolver las comunidades para alcanzar una mejor calidad de vida.

El proceso de tratamiento de las aguas residuales es una combinación de operaciones físicas, de procesos biológicos y químicos que remueven el material suspendido, coloidal o disuelto de dichas aguas. Las diferentes alternativas de tratamiento que se presentan, en ocasiones no suelen tener el impacto deseado, muchas veces por no corresponder realmente a las características específicas de cada región o por diferencias en la operación y mantenimiento de los sistemas. Bajo esta perspectiva se infiere que los sistemas que demandan uso intensivo de energía y recursos pasarán a un segundo orden en relación con sistemas naturales de menor complejidad, que permiten inversiones y costos

operacionales relativamente menores, siempre y cuando el espacio físico para su construcción no sea una limitante.

La eficiencia de tratamiento mediante lagunas de estabilización depende de factores biológicos, como lo son la fotosíntesis y la simbiosis benéfica entre algas y bacterias, el tipo de agua residual y la carga orgánica. Sin embargo, la actividad biológica en una laguna es afectada por las condiciones ambientales como son temperatura, viento, energía solar y humedad; y factores físicos como la geometría del estanque y el flujo hidráulico.

El comportamiento hidráulico de una laguna de estabilización es afectado por la forma de la misma, la presencia de espacios muertos, la existencia de diferencias de densidad, y la disposición de la entrada y la salida de las corrientes. Estas características hidráulicas tienen un efecto significativo en la dispersión del flujo, tiempo medio de retención, reducción de la carga orgánica ($DBO_{5,20}$) y reducción de organismo patógenos. El sistema de laguna de estabilización es capaz de asimilar cargas orgánicas e hidráulicas fluctuantes y sus dimensiones de diseño son proporcionales entre otros factores a estos mismos parámetros. En general, las lagunas de estabilización son sistemas muy eficientes, fáciles de operar e idóneas para la condición de clima tropical, lo cual se traduce en que sean ampliamente utilizadas.

El objetivo del presente Trabajo Especial de Grado es la caracterización de la laguna facultativa a escala piloto, ubicada en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la U.C.V. a través del estudio de los factores hidráulicos, físico-químicos y biológicos de influencia en la remoción de material orgánico carbonáceo, así como de los nutrientes nitrógeno y fósforo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las aguas residuales son el producto de las actividades humanas como lo son las domésticas, las municipales y las industriales, realizadas diariamente por la población. Dichas aguas son recogidas por un sistema de alcantarillado para luego ser tratadas apropiadamente, es decir se estabilizan a condiciones estándares de emisión establecidos en los reglamentos de la gran mayoría de los países, proceso que no se cumple en todos los casos. Finalmente son dispuestas en un receptor natural de ambiente acuático, donde el impacto desfavorable es de menor intensidad para algunos ecosistemas, pero no así, para otros que no pueden asimilar estos desechos.

Las lagunas de estabilización son sistemas que se sirven, en un espacio definido, de energía solar, de los vientos, de la temperatura, de la fotosíntesis y de la simbiosis benéfica entre algas y bacterias para producir, sin la necesidad de la retención forzada de biomasa activa, efluentes líquidos con calidad adecuada para alcanzar los estándares de emisión establecidos. El sistema es capaz de asimilar cargas orgánicas o hidráulicas fluctuantes y su eficiencia está influenciada por la transformación bioquímica como por los procesos de transporte hidráulico en el estanque. Sus dimensiones son proporcionales, entre otros factores, al caudal y a la carga orgánica para la cual son diseñadas.

El objetivo de este Trabajo Especial de Grado es caracterización del comportamiento de una laguna de estabilización facultativa a escala piloto, usada para el tratamiento de aguas residuales de origen municipal, en relación a: el comportamiento hidráulico y su respectivo balance de materia a diferentes caudales y la transformación de material orgánico carbonáceo, nitrógeno y fósforo.

El balance hídrico es evaluado en un tiempo equivalente al tiempo de retención del sistema para lo cual se contemplan los siguientes factores; afluente, efluente, aportes y pérdidas por infiltración, evaporación y precipitación, considerando así, todas las variables que permiten cerrar el balance en un tiempo para el cual la laguna es afectada por factores

Planteamiento del Problema

físico-químicos y meteorológicos. Permitiendo así, establecer la relación entre los parámetros.

Para el análisis de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre el comportamiento hidráulico, se debe considerar como factores de importancia: la acción de los vientos, en cuanto a su dirección como parámetro asociado a la formación de cortocircuito y velocidad como factor de mezclado; la temperatura como factor de estratificación térmica asociada con el mezclado de la laguna; y la radiación solar como el aporte energético natural al sistema.

A partir del estudio de la distribución del tiempo de residencia se obtienen los parámetros hidráulicos que permitan la interpretación del flujo en el sistema, como lo son presencia de cortocircuito y cuantificación de espacios muertos., sin embargo, a través de éste estudio no se puede identificar el trayecto y/o ubicación de dichos parámetros. En relación a esto se establece una distribución de puntos espaciales a lo largo de la geometría del sistema en estudio, los cuales permitirá el monitoreo del trazador a través de la laguna, esperando como resultado la identificación de lo mencionado anteriormente.

La determinación de los parámetros físico-químicos de interés ($DBO_{5,20}$, DQO, oxígeno disuelto, nitrógeno, fósforo, sólidos en todas sus formas, pH y temperatura), permite cuantificar la remoción de materia orgánica carbonácea y de los nutrientes nitrógeno y fósforo; determinar la estabilidad del sistema; y conjuntamente con el registro de los parámetros meteorológicos (temperatura media diaria, presión atmosférica, radiación solar, dirección, velocidad del viento, evaporación y precipitación), se establece la influencia de estos últimos sobre los primeros.

Otro punto de interés es el estudio de aporte de oxígeno a la laguna facultativa por reaireación y por la fotosíntesis algal asociando éste parámetro físico-químico con la radiación solar, lo que permite verificar la condición de operación facultativa.

OBJETIVOS

General:

- ✓ Establecer los factores de influencia en la eficiencia de la laguna de estabilización a escala piloto, en términos de remoción de materia orgánica carbonácea y los nutrientes fósforo y nitrógeno, para diferentes caudales de operación.

Específicos:

- ✓ Definir el comportamiento hidráulico de la laguna facultativa.
- ✓ Cuantificar el balance hídrico de la unidad para un tiempo de retención medio.
- ✓ Evaluar los parámetros meteorológicos de mayor incidencia en la operación del sistema.
- ✓ Estudiar la variación de los parámetros físicos-químicos a lo largo y profundo de la laguna facultativa.
- ✓ Establecer la influencia de la concentración de fitoplancton en la remoción de los nutrientes fósforo y nitrógeno.

Capítulo I,
Fundamentos Teóricos

CAPITULO I

I.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las lagunas de estabilización son el método más simple de tratamiento de aguas residuales que existe. La simbiosis entre bacterias y algas es el principal mecanismo que interviene en la transformación de las sustancias indeseadas; las bacterias descomponen la materia orgánica, formando nitrógeno inorgánico, NH_3 , NO_3^- , NO_2^- , fósforo, PO_4^{-3} ; y dióxido de carbono, CO_2 . Las algas usan estos compuestos, junto con la energía de la luz solar, para la fotosíntesis, liberando oxígeno para la solución. El oxígeno, a su vez, es asimilado por las bacterias, cerrando así el ciclo. El efluente de una laguna de estabilización contiene algas suspendidas y el exceso de los productos finales de la descomposición bacteriana. (Ver figura I.1). ^(Mendonça, 2.000).

Dependiendo del proceso biológico las lagunas son anaerobias, facultativas o aerobias. El caso de estudio a caracterizar es la laguna de estabilización facultativa.

Las lagunas de estabilización facultativas son estanques de profundidad entre uno y tres metros, donde la degradación de materia orgánica se realiza mediante procesos aerobios en la zona superior y anaerobios en la zona de fondo. Pueden operar como unidades de tratamiento primario o secundario, dependiendo de su ubicación en el sistema de tratamiento y características del efluente a tratar, las cargas orgánicas manejadas varían entre 200 y 1.000 Kg $\text{DBO}_{5,20}$ /ha*d. ^(Metacalf y Eddy, 1985; Normas Inos 1.976)

Para explicar el funcionamiento y la actividad de este tipo de instalación es necesario mencionar la acción de tres grupos principales de organismos que se integran para formar una asociación biológica muy útil. ^(Rengel, 1.977)

- Las algas productoras de oxígeno
- Las bacterias anaerobias y facultativas
- Las bacterias productoras de metano

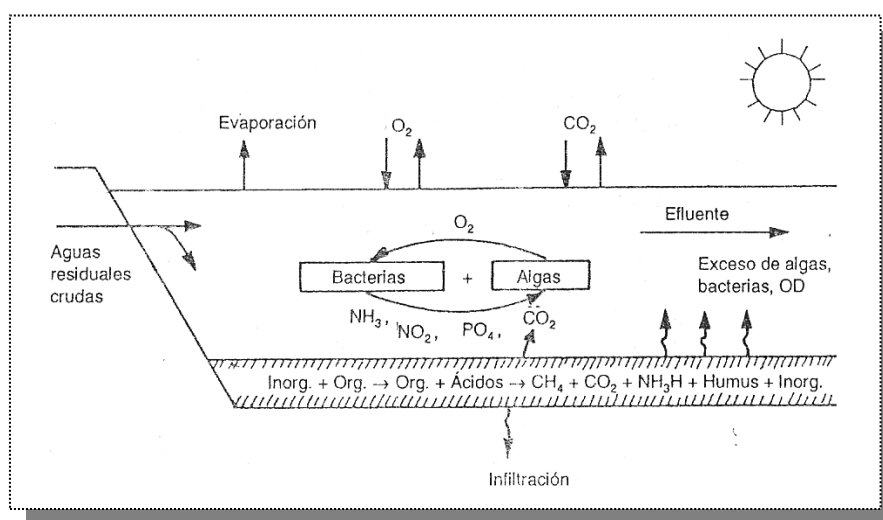


Figura I.1. Ecosistemas de una laguna facultativas. Adoptado de Mendonça S., 2000.

I.1. Parámetros que Caracterizan el Comportamiento Hidráulico de un Sistema.

Todos los tanques o lagunas usadas para el tratamiento de aguas residuales pueden denominarse reactor. Los patrones de caudal afectan el tiempo de exposición para el tratamiento y distribución del sustrato en el reactor. ^(Mendonça, 2.000)

Los modelos de flujo de una laguna de estabilización son afectados por la forma de la laguna, la presencia de espacios muertos, la existencia de diferencias de densidad y la disposición de la entrada y la salida de las corrientes. Estas características hidráulicas del flujo tienen un efecto significativo en la dispersión del flujo, tiempo medio de retención, carga orgánica y organismo patógenos, así como en la eficiencia del proceso de tratamiento. ^(Middlebrooks, 1.982)

I.1.1. Distribución de Tiempo de Residencia del Fluido (DTR)

La distribución de tiempos de residencia (DTR) de un reactor es una característica del mezclado que ocurre en la unidad. Esta información se determina de manera directa por un método de investigación empleado ampliamente llamado Estimulo-Respuesta. ^(Fogler, 2.001)

Es evidente que a los elementos del fluido que siguen diferentes caminos a lo largo del reactor les podría tomar tiempos diferentes en pasar a través de él. La distribución de estos tiempos en la corriente de fluido que sale del recipiente se denomina distribución de la edad a la salida, E, o distribución de tiempos de residencia (DTR) del fluido. Es conveniente representar la DTR de tal manera que el área bajo la curva sea la unidad, o sea:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

E(t): Función de distribución de tiempos de residencia, (d⁻¹)

t: Tiempo que transcurre una cantidad de trazador entre la entrada y su medición a la salida, (d).

Este procedimiento se denomina normalización de la distribución. (Levenspiel, 1.990)

I.1.2.- Medición de la DTR

La DTR se determina experimentalmente inyectando una sustancia, molécula o átomo inerte, llamado trazador, en el reactor en algún instante t = 0 y midiendo después la concentración del trazador C(t), en la corriente del efluente en función del tiempo. (Fogler, 2.001)

Los métodos de inyección más conocidos son: entrada en impulso (o pulso), escalón (o continua), periódica y aleatoria. Los experimentos en impulso y en escalón son más fáciles de interpretar, en tanto que los periódicos y los aleatorios son más difíciles. (Levenspiel, 1.990)

I.1.2.1. Inyección por Pulso (o Impulso)

En una entrada por pulso, cierta cantidad de trazador se inyecta repentinamente y en una sola ocasión en la corriente de alimentación que ingresa en el reactor. Luego se mide la concentración a la salida en función del tiempo. La curva representada por la concentración, C(t), en el efluente contra el tiempo se conoce como “curva C” en el análisis

de la DTR. Ver figura I.2. La relación entre la curva $C(t)$ y la curva $E(t)$ viene dada por: (Fogler, 2.001)

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

$C(t)$: Concentración del trazador a la salida de la unidad en el tiempo t , (ppb)

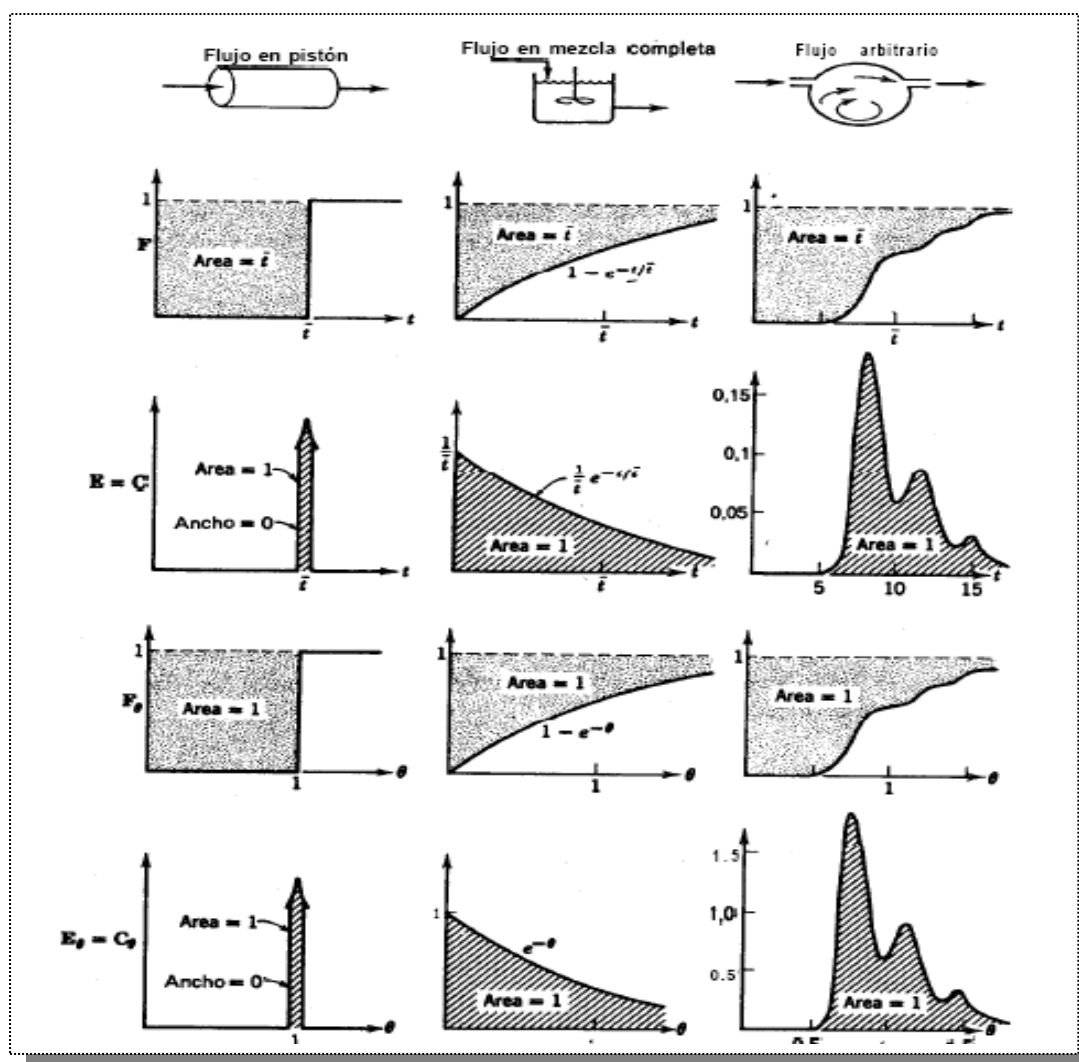


Figura I.2. Curvas típicas para el estudio de la DTR en las unidades de proceso. Adoptado de Levenspiel O., 1.990.

A partir del balance de materia para un reactor cualquiera se tiene que: ^(Fogler, 2.001)

$$\text{Media de la curva } E(\theta): \theta_C = \frac{\int_0^{\infty} \theta * E(\theta) d\theta}{\int_0^{\infty} E(\theta) d\theta} \quad \text{Ec.3}$$

donde:

θ_C : Relación de tiempo de retención adimensional, (adimensional).

θ : Tiempo de retención teórico adimensional, $\theta = t/t_0$, (adimensional).

t_0 : Tiempo espacial o tiempo de retención teórico, $t_0 = V/Q$, (d).

$E(\theta)$: Función de distribución de tiempos de residencia normalizada, $E(\theta) = t_0 * E(t)$, (adimensional).

I.1.2.2. Relación entre la Curva C y la Curva F

La siguiente ecuación establece la relación entre la curva C y la curva F: ^(Middlebrooks, 1.982)

$$F(\theta) = \int_0^{\theta} E(\theta) d\theta \quad \text{Ec.4}$$

Luego, para obtener la curva F a partir de una inyección por pulso, se debe considerar el trabajo realizado por Wolf y Resnick (1.963), ellos encontraron que para sistemas reales, la función F(t) está representada por la ecuación: ^(Arboleda, 2.000)

$$F(t) = \left(1 - \frac{C(t)}{C_0} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

F(t): Fracción del efluente que ha estado en el reactor un tiempo menor a t, (adimensional).

$\frac{C(t)}{C_0}$: Fracción de concentración acumulada, (adimensional).

I.1.3.- Determinación del Patrón de Flujo

La forma de obtener información sobre el patrón de flujo, mediante las curvas E(t) y F(t), se fundamenta en la determinación de una serie de parámetros adimensionales tales como: tiempo de retención medio, volumen muerto y desviación de flujo pistón, entre otros.

I.1.3.1.- Tiempo de retención teórico (o tiempo espacial)

Es el tiempo requerido por el reactor para procesar un volumen de alimentación equivalente al volumen del reactor, medido en condiciones determinadas. (Levenspiel, 1.990)

$$t_0 = \frac{V}{Q} \quad \text{Ec.6}$$

donde:

V: Volumen disponible del reactor, (m³).

Q: Caudal de entrada al reactor, (m³/d).

I.1.3.2.- Flujo no ideal o disperso.

El flujo disperso se define como aquel en que cada elemento del caudal tiene un tiempo de detención diferente para cada período. (Mendonça, 2.000)

En un reactor se puede presentar los siguientes parámetros de flujo:

- Flujo pistón.
- Flujo mezcla completa.
- Cortocircuitos.
- Espacios muertos.

Generalmente, en todo reactor real coexisten los cuatro fenómenos. En los reactores que se usan en plantas de tratamiento, se desea el mayor porcentaje de flujo de pistón (esto es que un diferencial de efluente permanezca en el reactor durante el tiempo de retención), el menor número de cortocircuitos y zonas muertas. (Arboleda, 2.000)

I.1.3.3.- Flujo Mezcla Completa

Se presenta cuando la composición del efluente en cualquier instante es idéntica al de toda la masa líquida. Ver figura I.3. O sea, que la composición de la sección del elemento “dL₂” es igual de la sección “dL₁” o cualquier otra, en cualquier momento. (Arboleda, 1.973)

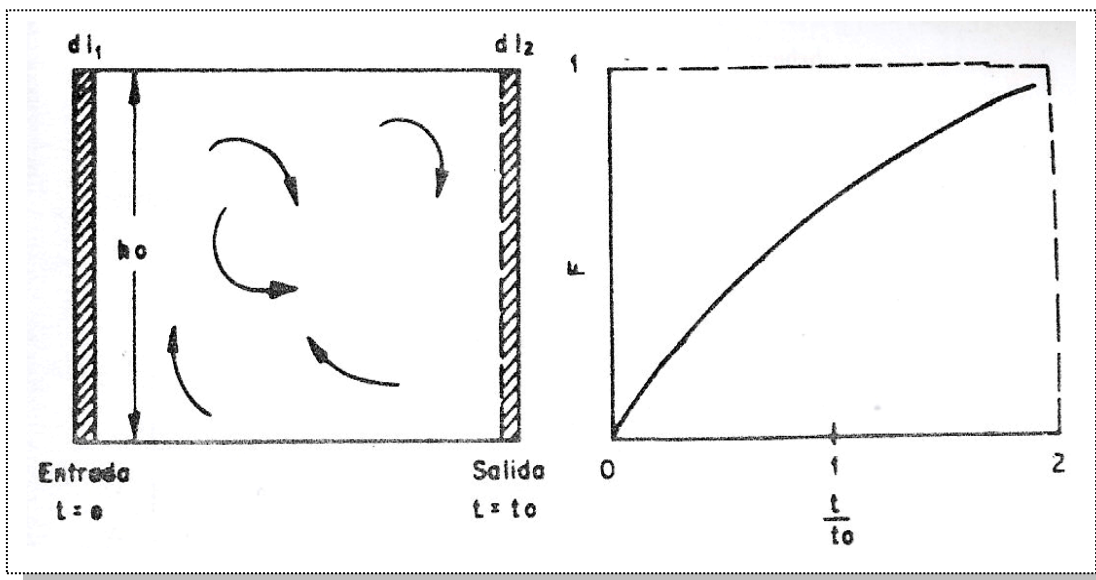


Figura I.3 Flujo Mezcla Completa. Adoptado de Arboleda V., Jorge (1.973)

La distribución de las aguas residuales en una laguna debe ser lo más uniforme posible, para que pueda utilizarse todo el volumen de la laguna proyectada para el tratamiento, obteniendo así el tiempo de retención ideal. De esa forma será posible evitar la formación de cortocircuitos o corriente preferenciales y zonas muertas o regiones en donde las aguas quedan quietas. ^(Mendonça, 2.000)

I.1.3.4.- Flujo Pistón

Se presenta cuando las láminas líquidas de espesor “ dL ” se trasladan perpendicularmente al sentido del flujo sin mezclarse. Ver la figura I.4. Es decir, cuando $F = 1$ para $t/t_0 = 1$, o sea, que ninguna fracción del flujo que entró en el tiempo $t = 0$ salió antes del tiempo $t = t_0$ y todo, en el tiempo t_0 . ^(Arboleda, 1.973)

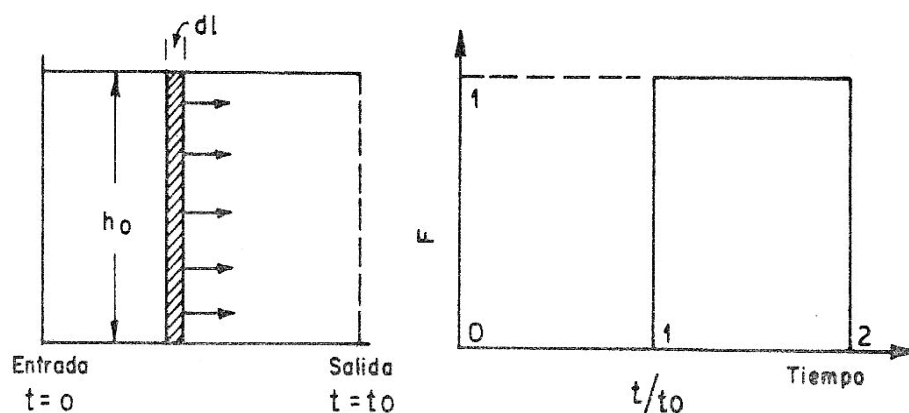


Figura I.4 Flujo Pistón. Adoptado de Arboleda V., Jorge (1.973)

La situación ideal para el flujo a través de una laguna de estabilización está dada por el flujo pistón. Si el flujo entrante se mezcla sólo verticalmente y horizontalmente, lo suficiente como para asegurar el tratamiento continuo, al tiempo que los movimientos a través de la laguna son de tipo flujo pistón, entonces, la condición óptima se ha alcanzado. Es decir, todo el fluido habrá permanecido el tiempo suficiente en la laguna para el grado deseado de tratamiento, y no habrá permanecido más de lo necesario. Esta condición conduce a una laguna de volumen mínimo para una carga residual dada a un costo mínimo. (Middlebrooks, 1.982)

I.1.3.5.- Volumen Muerto (o Zonas Estancadas)

Es aquella parte del volumen del reactor que permanece en reposo y se presenta por lo común en las esquinas de los reactores, ver figura I.5. (Arboleda, 1.973)

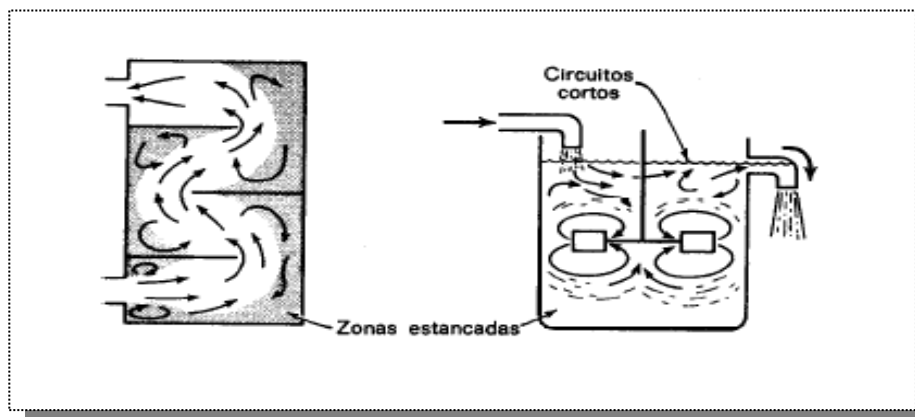


Figura I.5. Tipo de flujo no ideal que pueden presentar las unidades de proceso. Adoptado de Levenspiel, Octave (1.987).

El fluido a través de estos espacios toma entre 5-10 veces más tiempo en pasar a través del reactor que el flujo principal. (Middlebrooks, 1.982)

I.1.3.6.- Cortocircuito (o Cortocircuito Hidráulico)

Según Wolf y Resnick (1.963), lo definen como aquella parte del flujo que tiene una velocidad infinita y por tanto un tiempo de retención cero (ver figura I.5.). (Arboleda, 1.973)

La ocurrencia de cortocircuitos en las lagunas es la causa de varios problemas, como la aparición de zonas muertas o estancadas que reducen el volumen efectivo y el área superficial de la laguna, con la posibilidad de problemas de olor en las áreas sobrecargadas. La reducción de la eficiencia de la laguna es una consecuencia inevitable. (Mendonça, 2.000)

I.1.4.- Fórmulas para la Función F(t) Según el Modelo Simplificado de la Teoría de Wolf-Resnick (Arboleda, 2.000)

I.1.4.1.- Definiciones Básicas

Para un reactor, si no hay espacios muertos, el tiempo medio de residencia t_m es igual al tiempo teórico de detención t_0 y por tanto:

$$\frac{t_m}{t_0} = 1 \quad \text{Ec.7}$$

En este caso, es evidente que la fracción considerada como flujo pistón, al que se denomino “p”, más la fracción del flujo considerado como no de pistón (1-p) deben ser iguales a la unidad,

$$p + (1 - p) = 1 \quad \text{Ec.8}$$

donde:

p: fracción considerada como flujo pistón, (adimensional).

t_m: Tiempo de retención medio del reactor (d).

Cuando hay espacios muertos, si “Vm” es la fracción del volumen considerado como espacio muerto, la fracción efectiva será (1-Vm) y por tanto:

$$p(1 - Vm) + (1 - p)(1 - Vm) + Vm = 1 \quad \text{Ec.9}$$

donde:

Vm: fracción del volumen considerado como espacio muerto, (adimensional).

Wolf y Resnick (1.963) han propuesto un método que analiza la curva y no sólo las tendencias centrales. Para sistemas reales, la función F(t) está representada por la ecuación:

$$F(t) = \left(1 - \frac{C(t)}{C_{m\acute{a}x}} \right) = 1 - e^{-\eta \left(\frac{t}{t_0} - \theta_F \right)} \quad \text{Ec.10}$$

En la que:

$$\theta_F = p(1 - Vm) \quad \text{Ec.11} \quad ; \quad \eta = \frac{1}{(1 - p)(1 - Vm)} \quad \text{Ec.12}$$

Cuando $\theta_F = 1$ y $Vm = 0$ da como resultado $p = 1$; esto corresponde a la condición de flujo pistón. En cambio si $\theta_F = 0$ y $Vm = 0$ el flujo será mezcla completa, $p = 0$.

donde:

θ_F : Es el desplazamiento de la curva debido a los espacios muertos, (adimensional).

η : Caracteriza la eficiencia de la mezcla, (adimensional).

C_{máx}: Concentración máxima registrada del trazador en un tiempo t, a la salida del sistema, (ppb).

I.1.4.2.- Aplicando la Teoría de Wolf y Resnick (Arboleda, 2.000)

Sustituyendo las Ecs 11 y 12 en la Ec. 10 y reagrupando términos y tomando logaritmo en ambos lados Rebhun y Argaman (1.965), llegan a la siguiente ecuación:

$$\log(1 - F(t)) = \frac{-\log(e)}{(1 - Vm)(1 - p)} \left[\frac{t}{t_0} - p(1 - Vm) \right] \quad \text{Ec.13}$$

El valor $-\log(e)/(1-Vm)(1-p)$ se puede hallar graficando en el papel semilogarítmico $(1-F(t))$ en las ordenadas y t/t_0 en la abscisas, con lo que resulta una línea recta que forma un ángulo α con la horizontal. Esta línea se encontró que tiene una pendiente diferente a (-1) y no pasa por el origen, como sucedería de haber mezcla perfecta. Ver figura I.6

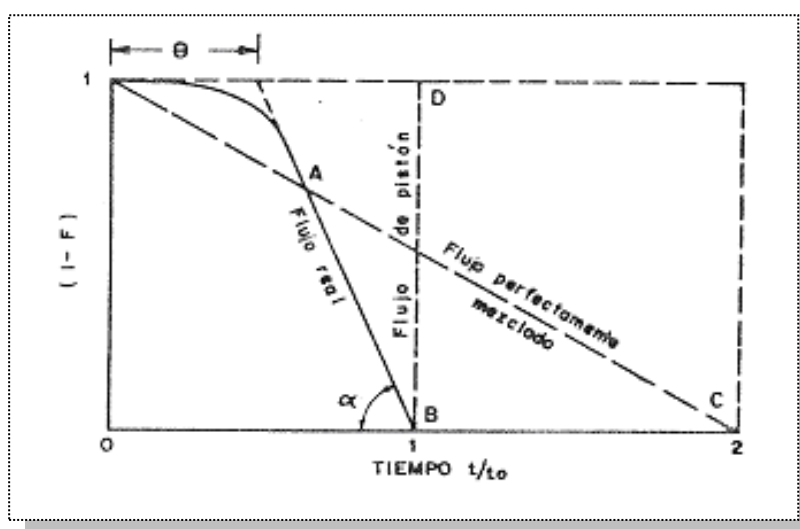


Figura I.6. Diagrama concentración-tiempo para flujo pistón y mezclado. Adoptado de: Arboleda V., Jorge (1.973).

Reordenando y haciendo los cambios correspondientes, se puede despejar p :

$$p = \frac{\theta_F * tg \alpha}{0,435 + \theta_F * tg \alpha} \quad \text{Ec.14}$$

I.1.4.3.- Resumen de Fórmulas

➤ La fracción considerada como flujo pistón:
$$p = \frac{\theta_F * tg \alpha}{0,435 + \theta_F * tg \alpha} \quad \text{Ec.14}$$

➤ La fracción considerada como flujo mezcla completa:
$$FMC = 1 - p \quad \text{Ec.15}$$

➤ Fracción de volumen considerado como zona muerta:
$$Vm = 1 - \frac{\theta_F}{p} \quad \text{Ec.16}$$

➤ Fracción de volumen considerado como efectivo:
$$V_e = 1 - Vm \quad \text{Ec.17}$$

I.1.5.- Fórmulas Básicas para la Función C(t), (Desarrolladas por Mangelson y George, 1.973). (Middlebrooks, 1.982)

I.1.5.1.- Tiempo de Retención Adimensional (θ_c)

El tiempo de residencia adimensional, es la distancia del origen al centroide del diagrama de la curva C, entre el origen y θ_0 . El valor de θ_0 se toma arbitrariamente como 2, porque después de un tiempo de retención $C(t)/C_0$ igual a dos se ha observado, generalmente, que el valor es despreciable y datos tomados después de este punto, presentan valores cercanos al límite de legibilidad de los instrumentos. Además, si todos los parámetros son construidos usando los datos $0 < \theta < 2$, la comparación entre los resultados es apropiada. Para los propósitos de este trabajo, la ecuación 4 se convierte en:

$$\theta_c = \frac{\int_0^2 \theta E(\theta) d\theta}{\int_0^2 E(\theta) d\theta} \quad \text{Ec.18}$$

Para el comportamiento hidráulico que produce el máximo desempeño biológico el tiempo de residencia teórico adimensional es cercano a la unidad ($\theta = 1,0$). Cuando θ_c aumenta para las condiciones hidráulicas dadas, la conversión biológica aumenta, por lo tanto aumentará el tiempo de residencia teórico adimensional (θ) de las partículas fluidas.

El tiempo de permanencia de las aguas residuales dentro de la laguna es, sin duda, un factor decisivo, que puede determinar la eficiencia del sistema. Tiempos cortos no

permiten la acción sinérgica del sistema algas/bacterias, pues no posibilitan la generación de una biomasa significativa de algas. Tiempos muy prolongados pueden inducir el crecimiento exagerado del fitoplancton, que forma una densa capa verde superficial. Esta capa causa el ensombrecimiento de las capas inferiores del agua, causando la inhibición de la fotosíntesis, la producción de oxígeno, la elevación del pH, etc., es decir, se produce la ruptura de las interrelaciones algas/bacterias y pueden aparecer condiciones anaerobias durante el día. (Mendonça, 2.000)

I.1.5.2.- Volumen Muerto (V_m)

Para la curva C, la cantidad de espacio muerto en un reactor es representado por una prolongación de la cola de la curva. Si el flujo a través del reactor tiene un mínimo de espacio muerto, entonces el tiempo de retención medio del reactor t_m se acercará al tiempo espacial (t_0) y el valor adimensional θ_c es próximo a la unidad (1,0). Si hay suficientes zonas muertas en el reactor, entonces una porción del trazador dejará el reactor antes de las $\theta = 1,0$. Por consiguiente, el centroide de la curva C cambiará en dirección al origen y el valor de θ_c será menor que la unidad ($< 1,0$). La expresión siguiente define cuantitativamente el volumen muerto (V_m) (Middlebrooks, 1.982):

$$V_m = 1 - \theta_c [F(\theta)]_{\theta=2} \quad \text{Ec.19}$$

donde:

[F ($\theta = 2$)]: es la fracción de masa total de trazador que ha salido de la laguna, calculada a partir de la ecuación 5, (adimensional).

I.1.5.2.- Desviación Respecto del Flujo Pistón (θ_{pf})

La ecuación para calcular la desviación respecto del flujo pistón (θ_{pf}), viene dado por:

$$\theta_{pf} = \frac{\int_0^1 (1 - \theta) E(\theta) d\theta}{\int_0^1 E(\theta) d\theta} \quad \text{Ec.20}$$

donde:

θ_{pf} : Fracción de desviación del flujo pistón, (adimensional).

El valor del parámetro del flujo pistón, θ_{pf} , disminuye cuando aumenta la eficiencia hidráulica. Consecuentemente la máxima eficiencia hidráulica y la máxima conversión ocurren cuando el $\theta_C = 1,0$, lo mismo ocurre cuando el $\theta_{pf} = 0$.

I.1.6.- Modelo de Dispersión Axial, (Desarrolladas por Levenspiel y Smith 1.957).

Los modelos son útiles para representar el flujo en recipientes reales, para el escalamiento y para identificar el flujo defectuoso. Existen diferentes tipos de modelos, lo que depende de si el flujo es cercano a mezcla completa, flujo pistón o intermedio entre estos. El modelo de dispersión se fundamenta en las desviaciones con respecto al flujo pistón. ^(Levenspiel, 1.990)

El número de dispersión, caracteriza las condiciones de mezcla en un reactor. ^(Mendonça, 2.000)

I.1.6.1.- Definiciones Básicas ^(Levenspiel, 1.990)

La desviación del flujo pistón suele ocurrir debido a la existencia de dispersión en el flujo. La dispersión “d”, en términos generales, es el parámetro que mide la mezcla del fluido en la dirección axial:

- Cuando $d \rightarrow \infty$, se tiende a mezcla completa.
- Cuando $d \rightarrow 0$, se tiende a flujo Pistón.

El parámetro “d” se calcula registrando la forma de la curva del trazador a la salida del reactor. En particular, se mide la media y la varianza. Con este fin la medida más importante es el parámetro localización de la distribución, que se denomina media o centroide de la distribución. Por ejemplo, para la curva C esta medida viene dada por:

$$\text{Media de la curva } C_{\text{impulso}}: t_m = \frac{\int_0^{\infty} t * C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad \text{Ec.21}$$

La otra variable descriptiva, en orden de importancia, es la amplitud de la distribución que corrientemente se mide por la varianza σ^2 , definida por:

$$\text{Varianza de la curva C: } \sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 * C(t) dt}{t_m^2 \int_0^{\infty} C(t) dt} - 1 \quad \text{Ec.22}$$

donde:

σ^2 : varianza (d^2)

Para grandes desviaciones respecto del flujo pistón, ($d > 0,01$), entra en juego una complicación adicional; lo que ocurrirá justo a la entrada y a la salida del sistema afecta en gran medida la forma de la curva del trazador, y también la relación entre los parámetros de la curva y d .

Se consideran dos tipos de condiciones fronteras: que el flujo no sea afectado al pasar a través de la entrada y salida del sistema (llamada condición frontera abierta), o que se tenga flujo pistón fuera de las fronteras del sistema (llamada condición frontera cerrada). Así mismo, se pueden presentar combinaciones de los casos anteriores.

Ahora bien, solamente una condición frontera da una curva del trazador que es idéntica a la función $E(t)$ y que se ajusta a todas las expresiones matemáticas del flujo no ideal, y esa es la del recipiente cerrado. Para todas las demás condiciones frontera no se consigue una DTR apropiada.

I.1.6.2. Análisis para Frontera Cerrada (Levenspiel, 1,990)

En este caso no se dispone de una expresión analítica para la curva C . Sin embargo, se puede construir la curva por métodos numéricos o calcular exactamente su media y su varianza, como lo hizo por primera vez Van der Laan. Así:

$$t_m = t_0 = \frac{V}{Q} \quad \dots \text{ ó } \dots \quad \theta_c = \frac{t_m}{t_0} = 1 \quad \text{Ec.21 - 22}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{t_0^2} = 2d - 2d^2 \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{d}\right)} \right] \quad \text{Ec.23}$$

I.1.6.3. Consideraciones del Modelo

- Si el flujo se desvía considerablemente del flujo pistón, es muy probable que el reactor real no cumpla la hipótesis del modelo (una gran cantidad de fluctuaciones al azar independientes). En este caso es incluso cuestionable si debería usarse el modelo. Levenspiel, recomienda no usar el modelo para valores de $d > 1$.
- Se debe siempre considerar si debe utilizarse el modelo. Es posible hacer coincidir siempre los valores de la varianza, pero si la curva C presenta alguna de estas características de manera muy pronunciada: doble pico, asimetría o cola larga, no debe utilizarse este modelo. Ver figura I.7.

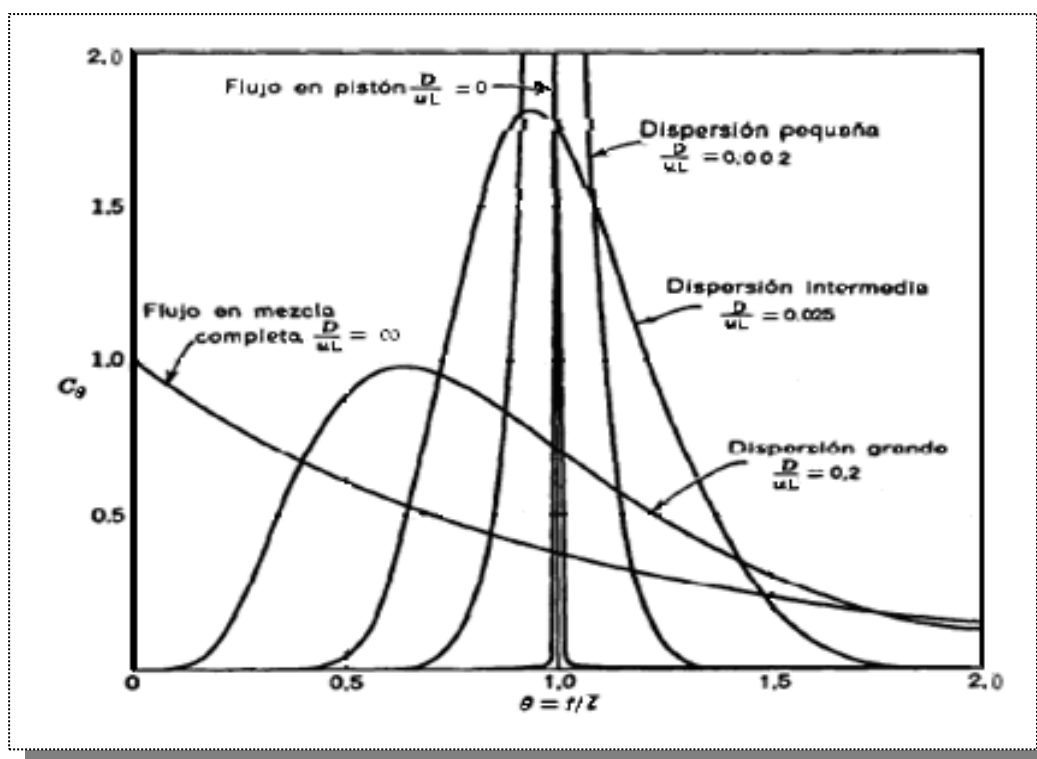


Figura I.7- Curvas de respuesta de un trazador para reactores cerrados y grandes desviaciones respecto del pistón. Adoptado de Levenspiel O., 1.990.

I.2.- Parámetros Hídricos

I.2.1.- Balance de Hídrico ^(Mendonça, 2.000)

El balance hídrico incluye todo los factores de pérdidas y aportes al sistema, tales como: efluente, evaporación, afluente, precipitación e infiltraciones.

La infiltración puede presentarse de dos formas: *aporte por infiltración*, ocurre cuando el nivel freático está por encima del fondo de la laguna; *pérdida por infiltración*, ocurre cuando el nivel freático está por debajo del fondo de la laguna. Y suceden cuando no hay impermeabilización de la laguna, o cuando estanques hechos de concreto, presentan fractura.

El balance hidrico está dado por:

$$Q_e = Q_a + (P + A_i) - (E - P_i) \quad \text{Ec.24}$$

Q_e : Caudal efluente, (l/min).

Q_a : Caudal afluente, (l/min).

P: Precipitación, (l/min).

A_i : Aporte por infiltración, (l/min).

E: Evaporación, (l/min).

P_e : Pérdida por infiltración , (l/min).

I.3.- Parámetros Físico-Químicos.

I.3.1.- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_{5,20})

Cuantifica el consumo de oxígeno requerido por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable carbonácea en medio aerobio a una temperatura de 20 °C y un periodo de 5 días presente en el agua residual. Los valores aportados por la DBO_{5,20} permiten; determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual, determinar el tamaño de las instalaciones de tratamiento de agua residual y medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento, así como evaluar el impacto de la descarga sobre un cuerpo de agua. ^(Metacalf y Eddy, 1.985)

La demanda de oxígeno de las aguas residuales se debe a tres clases de materiales:

- Materia orgánica carbonosa usada como fuente de alimentación por los organismos aerobios.
- Nitrógeno oxidable derivado de nitritos, amoníaco y compuestos de nitrógeno orgánico, que sirven de sustrato para bacterias específicas del género Nitrosomonas y Nitrobacter, que oxidan el nitrógeno amoniacal en nitritos y nitratos.
- Compuestos reductores químicos, como sulfito (SO_3^{-2}), sulfuro (S^{-2}) y el ion ferroso (Fe^{+2}), que son oxidados por oxígeno disuelto. (Mendonça, 2000)

I.3.3.- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se define como la cantidad de oxidante fuerte ($\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{K}_2$) expresada en equivalente de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica. La DQO en aguas residuales, por lo general, es mayor que la DBO porque es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que biológicamente. La DQO se puede determinar en tres horas. (Metacalf y Eddy, 1.985)

La ventaja de las mediciones de DQO es que los resultados se obtienen rápidamente, pero tienen la desventaja de que no ofrecen ninguna información de la porción del agua residual que puede ser oxidada por las bacterias ni de la velocidad del proceso de biooxidación. (Mendonça, 2.000)

I.3.4.- Oxígeno Disuelto (OD)

Es el factor que determina si los cambios biológicos son llevados a cabo por organismos aerobios o anaerobios. En las lagunas de estabilización existen dos fuentes de oxígeno disuelto: reaireación superficial y oxigenación fotosintética. (Metacalf y Eddy, 1985)

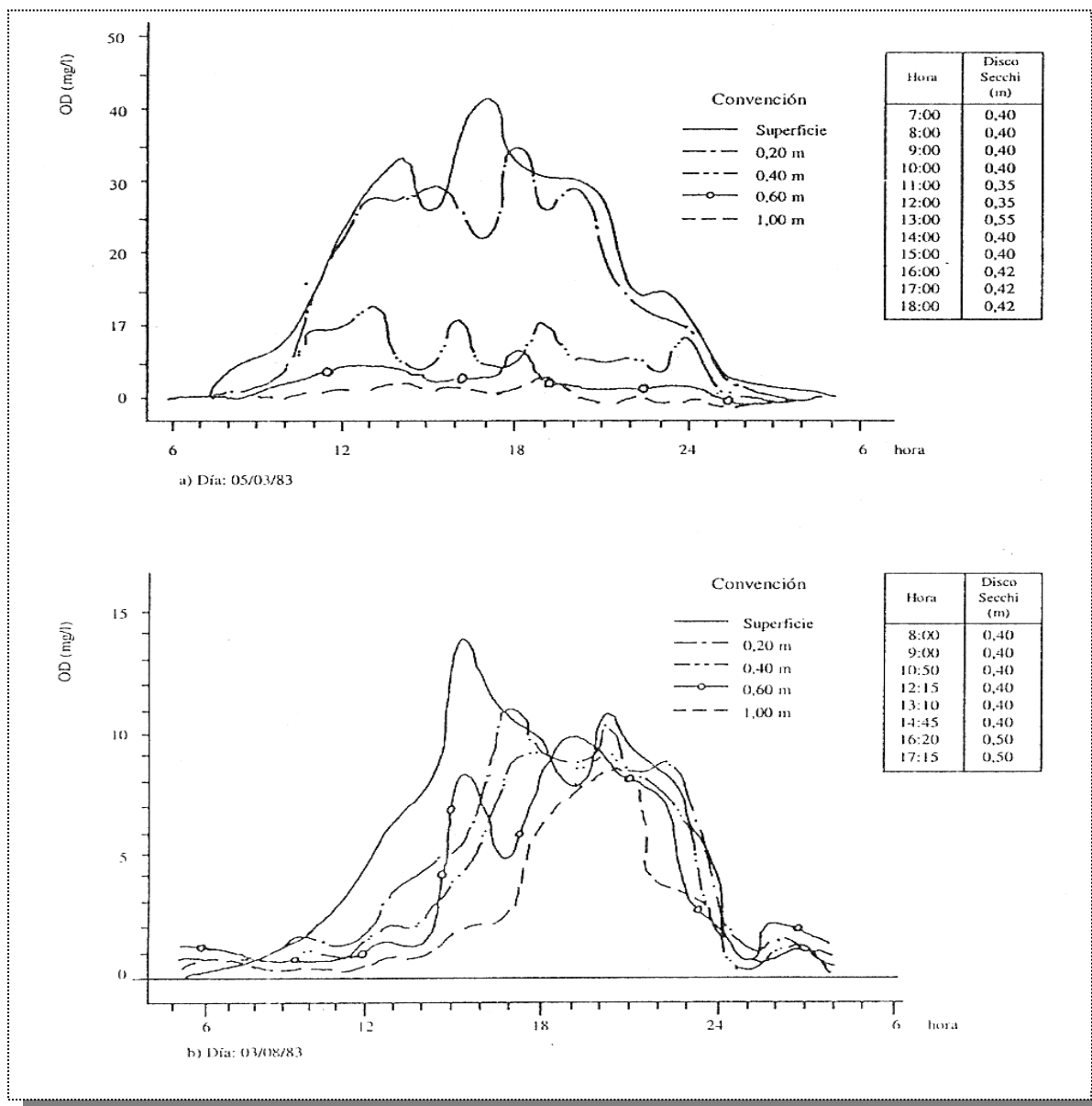
La solubilidad del oxígeno atmosférico en aguas dulces oscila entre 7 mg/l a 35 °C y 14,6 mg/l a 0 °C, para presiones de 1 atmósfera. La baja disponibilidad de oxígeno disuelto, OD, limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las aguas residuales para su disposición en ríos y embalses. En general, todo proceso aerobio requiere una concentración de OD mayor de 0,5 mg/l. (Romero, 1.999)

Capítulo I. Fundamentos Teóricos

La actividad bacteriana se torna más intensa en temperaturas más altas, en las cuales el oxígeno disuelto es usado a una tasa mayor. Si la cantidad de oxígeno solicitado no se compensa por una producción más alta de oxígeno, las condiciones anaerobias pueden prevalecer y el efluente puede tornarse turbio y aparecer malos olores. ^(Mendonça, 2.000)

Capítulo I. Fundamentos Teóricos

En la I.8., se observa la distribución de oxígeno a diferentes profundidades y se considera el nivel del disco secchi. La figura I.8.a muestra altas concentraciones de oxígeno disuelto para profundidades menores a la del disco secchi, mientras que la figura I.8.b



muestra concentraciones próximas de oxígeno disuelto en las diferentes profundidades.

Figura I.8. Variaciones horario de oxígeno disuelto en las diferentes profundidades de una laguna facultativa con profundidad útil de 1,2 metros. Adoptado de Mendonça S (2.000).

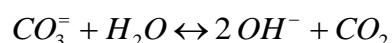
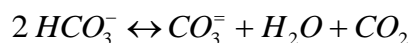
I.3.4.- pH

Tanto las lagunas anaerobias como las facultativas operan en forma eficiente con valores de pH ligeramente básicos.

En caso de las lagunas facultativas, cuando el color de la laguna se presenta verde oscuro, el valor del pH probablemente será básico. Si el color es verde-amarillo o pálido, indica con certeza que se ha iniciado el proceso de acidificación. En países tropicales, las lagunas anaerobias funcionan satisfactoriamente, con pH óptimo que varía de 7,0 a 7,2, con predominio de la fase metanogénica sobre la fase ácida de formación de ácidos volátiles. (Mendonça, 2.000)

Aguas residuales en concentraciones adversas del ión hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos. Aguas con pH menores de 6, favorecen el crecimiento de hongos sobre las bacterias. El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, sin embargo, generalmente es de 6,5 a 8,5. (Romero, 1.999)

Las algas pueden utilizar CO_2 a partir de los bicarbonatos y carbonatos de acuerdo con las siguientes reacciones: (Romero, 1.999)



Los altos valores de pH y oxígeno molecular presentes en la laguna de estabilización en las horas más iluminadas del día son el producto de la actividad fotosintética de las algas.

El pH de una laguna facultativa varía a lo largo del día en las diferentes capas de la masa líquida, prevaleciendo valores más elevados en la superficie. Durante las primeras horas de la mañana, los valores del pH son bajos, debido a la presencia de exceso de gas carbónico (CO₂) producido por la respiración bacteriana durante la noche. Se vuelven más elevados en periodos comprendidos entre las 14 y 16 horas, cuando las algas se encuentran en plena actividad fotosintética. Durante la noche el pH vuelve a declinar sensiblemente, pues, de un lado, las algas dejan de consumir gas carbónico, y del otro, éste continúa siendo producido por las bacterias. (Mendonça, 2.000)

I.3.5.- Sólidos

El contenido de sólidos de un agua afecta directamente la cantidad de lodo que se produce en el sistema de tratamiento y/o disposición. (Romero, 1.999)

La característica física más importante del agua residual es su contenido de sólidos totales, el cual está compuesto por materia flotante y materia en suspensión; en dispersión coloidal y en solución.

- Los Sólidos Totales: se definen como toda la materia que queda como residuo después de la evaporación del agua a 103-105 °C. Los mismos a su vez se dividen en sólidos suspendidos y sólidos disueltos y éstos a su vez en volátiles y fijos. (Metacalf y Eddy, 1.985)
- Los Sólidos Disueltos: representan el material soluble y coloidal, el cual requiere, usualmente, para su remoción, oxidación biológica o coagulación y sedimentación. Los sólidos suspendidos o no disueltos constituyen la diferencia entre los sólidos totales de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada. (Metacalf y Eddy, 1.985)
- Los Sólidos Volátiles: son básicamente, la fracción orgánica de los sólidos o porción de los sólidos que se volatiliza a temperaturas de aproximadamente 600 °C. (Metacalf y Eddy, 1.985)

- Los Sólidos Sedimentables: son una medida del volumen de sólidos asentados al fondo de un cono Imhoff, en un período de una hora, y representan la cantidad de lodo removible por sedimentación simple. (Romero, 1.999)

Origen de sólidos suspendidos: (Rengel, 1.977)

- Los presentes en el desecho afluente.
- Los sólidos bacterianos sintetizados durante el metabolismo de los desechos orgánicos.
- Los sólidos algáceos sintetizados durante la fotosíntesis

Los mecanismos responsables de la deposición de lodos son los siguientes: (Rengel, 1.977)

- Sedimentación de los sólidos suspendidos afluentes.
- Biofloculación de la biomasa algacea y bacteriana en presencia del oxígeno molecular.
- Autofloculación de algas, bacterias y “detritus” orgánicos enredado en la masa de partículas mayores, flóculos, formados debido a los aumentos de temperatura y pH.

I.3.6.- Nutrientes

Cualquier sistema biológico que haya de funcionar correctamente, deberá disponer de nutrientes en las cantidades adecuadas. Los principales nutrientes requeridos son el nitrógeno y fósforo. (Metcalf y Eddy, 1.985)

Los elementos nitrógeno y fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas y, como tales, son conocidos como nutrientes o bioestimulantes. Vestigios de otros elementos, tales como el hierro, son necesarios para el crecimiento biológico, pero el nitrógeno y el fósforo son, en la mayoría de los casos, los principales elementos nutritivos. (Metcalf y Eddy, 1.985)

I.3.6.1.- Nitrógeno

La conversión de nitrógeno orgánico, en otras formas nitrogenadas, da como resultado una pérdida de nitrógeno, ya sea por la utilización de las algas en su metabolismo

o por actividad bacteriana. La pérdida de nitrógeno amoniacal, en forma de gas, sólo ocurre bajo ciertas condiciones que son frecuentes en lagunas. Algunos estudios señalan que el 99% del nitrógeno en lagunas se remueve mediante este mecanismo, especialmente en lagunas primarias de sistemas múltiples.

La forma predominante del nitrógeno en aguas residuales domésticas frescas es el nitrógeno orgánico; las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos. El predominio de los nitratos indica que el residuo ha sido estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno. Los nitratos, sin embargo, pueden ser utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteína y, por ello, puede ser necesaria la remoción del nitrógeno para prevenir dichos crecimientos. (Ver figura I.9.)^(Romero, 1.999)

En aguas residuales domésticas la concentración de nitrógeno total puede ser de 30 a 100 mg/l; la de nitrógeno amoniacal de 5 a 20 mg/l, la de nitritos y nitratos menor de 1 mg/l. (Romero, 1.999)

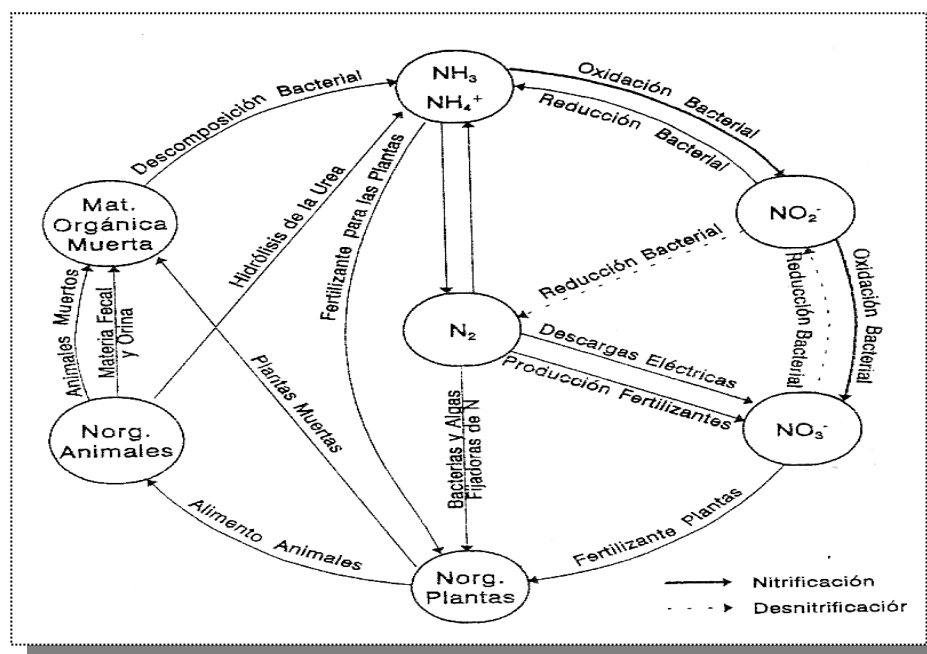


Figura I.9.- Ciclo del Nitrógeno. Adoptado de Rojas J. 1999.

I.3.6.2.- El Fósforo

Es un factor limitante en la mayoría de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, la mayoría de las aguas residuales son ricas en este elemento. Normalmente el fósforo se presenta en tres formas: particulada, orgánica soluble o inorgánica (ortofosfatos), siendo ésta última la utilizada por los organismos. Algunos organismos pueden almacenar el fósforo en la forma de polifosfatos, los cuales pueden utilizarse posteriormente junto con los fosfatos liberados de los sedimentos que se hallan atrapados en forma de precipitados insolubles.

La remoción de fósforo, en lagunas, es el resultado de procesos físicos como adsorción, coagulación y precipitación. Su consumo para funciones metabólicas, así como en almacenamiento, contribuye en un buen porcentaje de la remoción.

Es también esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido a los crecimientos explosivos nocivos que tienen lugar en las aguas superficiales, existe mucho interés en la actualidad en controlar la cantidad de los compuestos de fósforo que entran en las aguas superficiales a través de los vertidos de aguas residuales industriales y domésticas y de las escorrentías naturales. Por ejemplo, las aguas residuales municipales pueden contener de 6 a 20 mg/l de fósforo como “P”.

Las formas más frecuentes en que se encuentra el fósforo en soluciones acuosas son ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. Los ortofosfatos, por ejemplo, PO_4^{3-} , HPO_4^- , H_2PO_4^- , y H_3PO_4 , se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin precisar posterior ruptura. Los polifosfatos incluyen las moléculas con dos o más átomos de fósforo, átomos de oxígeno y, en algunos casos, átomos de hidrógeno combinados en una molécula completa. Los polifosfatos sufren hidrólisis en soluciones acuosas y vuelven a sus formas de ortofosfato; sin embargo, esta hidrólisis es generalmente de menor importancia en la mayoría de las aguas residuales domésticas, pero puede ser un importante constituyente de las aguas residuales industriales y lodos de aguas residuales domésticas.

El ortofosfato puede determinarse añadiendo directamente una sustancia, tal como molibdato amónico, que forma un complejo coloreado con el fosfato. Los polifosfatos y fosfatos orgánicos deben convertirse en ortofosfatos antes de poder ser determinados de forma semejante. (Metcalf y Eddy, 1.985)

I.4.- Parámetros Meteorológicos

I.4.1.- Acción de los Vientos

La acción de los vientos es útil cuando es posible la homogeneización de la masa líquida, llevando oxígeno de la superficie a las capas más profundas, haciendo que el afluyente y los microorganismos se dispersen en toda la extensión de esa masa. Auxilian el movimiento de las algas, principalmente de aquellas especies desprovistas de movimiento propio y consideradas grandes productoras de oxígeno, como las algas verdes del género *Chlorella*. Cuando la fotosíntesis no sea suficiente por existir déficit de oxígeno, el movimiento puede contribuir a la transferencia y difusión de oxígeno de la atmósfera hacia la masa líquida. (Mendonça, 2.000)

Los dispositivos de entrada y salida de la laguna deben estar localizados de modo que la dirección de los vientos predominantes ocurra del efluente hacia el afluyente. Esto hará que no se favorezca la formación de cortocircuitos en las lagunas, y evitará la salida de sobrenadantes en el efluente. (Mendonça, 2.000)

La mezcla de las aguas de una laguna de estabilización depende de varios factores, entre ellos el viento. La energía del viento disipada en mezcla es función de la extensión superficial de la laguna; por ello, las lagunas grandes tienden a tener mejor mezclado que las lagunas pequeñas. En lagunas poco profundas, el viento continuo induce circulación y promueve la mezcla del agua para producir un perfil de temperatura aproximadamente uniforme. (Romero, 1.999)

En muchas lagunas se ha observado, por las mañanas, durante un tiempo cálido y con buenos vientos, color verde debido a la presencia superficial de las algas verdes y una

coloración gris a medida que las algas verdes se alejan de la zona fótica y de las capas superficiales más calientes. (Romero, 1.999)

I.4.1.2.- Temperatura

Como en una laguna de estabilización no existe temperatura uniforme, se torna más conveniente usar la expresión temperatura media de la laguna o temperatura superficial de la laguna, de acuerdo con el caso, a cambio de temperatura de la laguna. (Mendonça, 2.000)

Las reacciones físicas, químicas y biológicas que ocurren en las lagunas de estabilización son muy influenciadas por la temperatura. Es un parámetro que se relaciona con la radiación solar y afecta tanto la velocidad de la fotosíntesis como la del metabolismo de las bacterias responsables de la depuración de las aguas residuales. Esos fenómenos son retardados por las bajas temperaturas. (Mendonça, 2.000)

La producción óptima de oxígeno para algunas especies de algas en las lagunas facultativas se obtiene entre 20 y 25 °C, con valores límite superior e inferior, respectivamente, de 37 y 4 °C. A partir de temperaturas próximas a 35 °C, la actividad fotosintética de las algas decrece. Las Chlorophytas (algas verdes) tienden a disminuir o a desaparecer y las Euglenophytas (euglenas) pasan a predominar. Por encima de los 35 °C, prevalecen las Cyanophytas (algas azules) y particularmente las Oscillatorias. Además, es probable que lagunas con temperaturas más altas sean más sensibles a choques hidráulicos o a repentinos aumentos de carga orgánica, con la consecuente menor eficiencia en la remoción de DBO. (Mendonça, 2.000)

La actividad de las algas puede cesar después de una brusca disminución en la temperatura, originando sedimentación parcial de las mismas, lo que generará una aclaración en la coloración verdosa de las lagunas, acompañada de una disminución de su eficiencia. (Mendonça, 2.000)

Se ha verificado, con relación a la calidad del efluente, que en los meses más fríos hay un aumento en la concentración de amonio y fósforo y una disminución de los sólidos

en suspensión. Todos estos fenómenos están íntimamente relacionados con el decrecimiento de las algas. (Mendonça, 2.000)

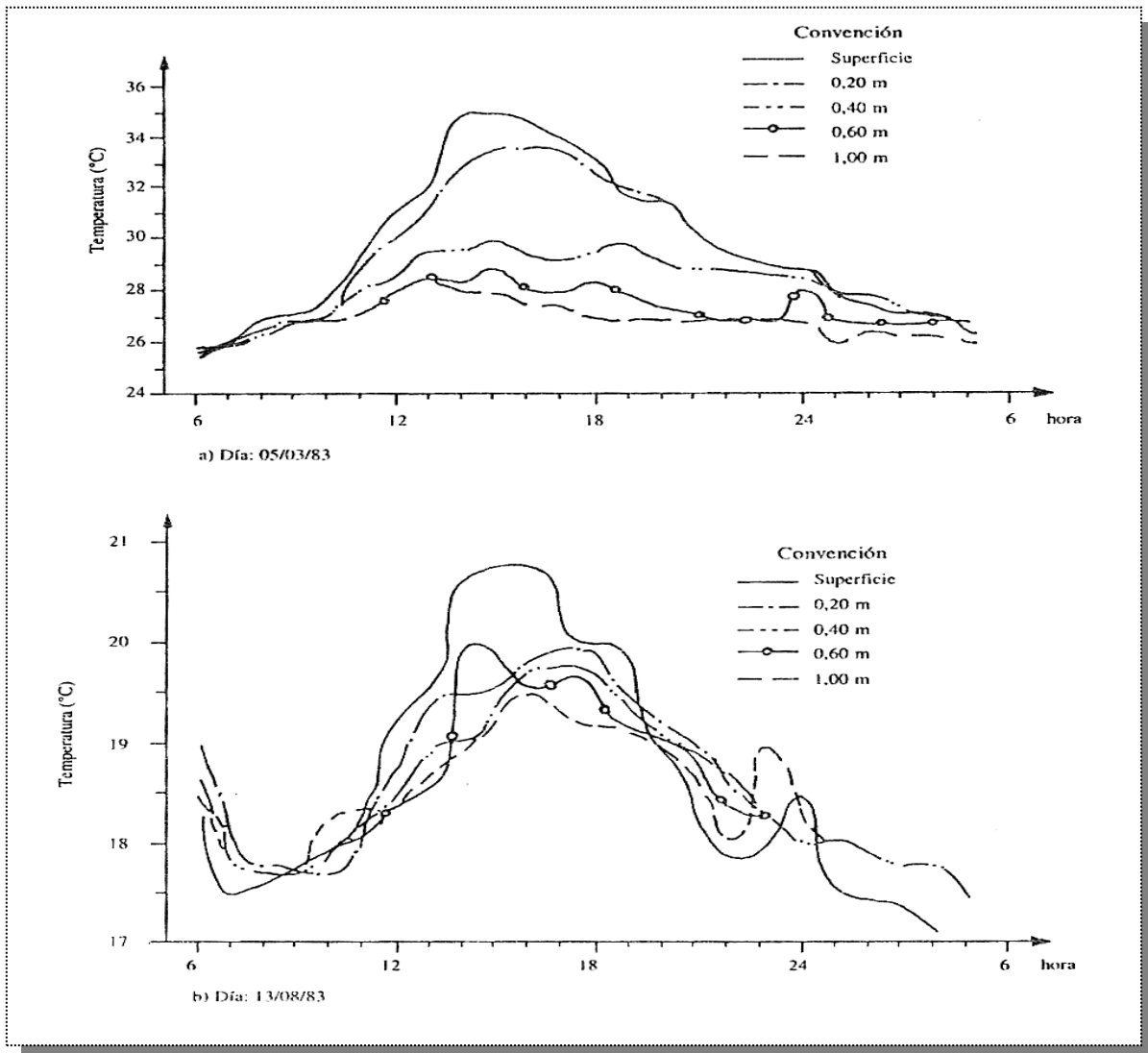


Figura I.10.- Variación horario de la temperatura a diferentes profundidades de una laguna facultativa (profundidad útil: 1,20 m). Adoptado de Mendonça S., 2.000.

Los cambios bruscos o repentinos en la temperatura pueden acarrear problemas de corta duración en las lagunas facultativas. La figura I.10., presenta esta variación. (Mendonça, 2.000)

La temperatura tiene también un efecto importante sobre la mezcla del agua en la laguna, especialmente si se observa la formación de una termoclina o capa de agua que separa una zona caliente superior de una zona inferior más fría. La fuente principal de calor hacia la laguna es la radiación solar. (Romero, 1.999)

En lagunas poco profundas, sin vientos y con climas cálidos se pueden desarrollar estratificaciones térmicas transitorias y formarse una termoclina o capa de fuerte disminución de temperatura, la cual puede desaparecer durante el tiempo frío y ventoso. La mezcla térmica del agua y la presencia de la termoclina depende, por lo tanto, de las condiciones específicas ambientales de cada laguna. La temperatura del agua en las lagunas es 2 a 3 °C superior a la temperatura ambiental en el invierno y 2 a 3 °C menor que la temperatura ambiental durante el verano. (Romero, 1.999)

La variación de temperatura del agua en las lagunas es menor que en el aire, en virtud de que la inercia térmica del agua es mayor que la del aire. La temperatura superficial del agua es casi siempre inferior a la del aire. (Mendonça, 2.000)

I.4.3.- Precipitaciones Pluviales

Las precipitaciones pluviales media y máxima podrán tener alguna influencia en la actuación y confiabilidad de la laguna. El tiempo de retención podría reducirse durante períodos de lluvia. Lluvias intensas pueden diluir el contenido de las lagunas poco profundas, afectando el alimento disponible para la biomasa. El aumento repentino del caudal podrá acarrear hacia el efluente grandes cantidades de sólidos, arrastre significativo de la población de algas y de materiales inorgánicos, principalmente arcilla. Sin embargo, la precipitación directamente en el espejo de agua de la laguna no ha provocado efectos duraderos o perjuicios mensurables en las lagunas de estabilización. (Mendonça, 2.000)

I.4.4.- Radiación solar

La energía solar es indispensable para la operación efectiva de las lagunas facultativas, ya que contribuye a la producción de oxígeno por medio de la fotosíntesis de las algas. Sin embargo, la idea de que la velocidad de fotosíntesis aumenta sin límite en la medida que aumenta la radiación solar, no es cierta. De hecho, por encima de una determinada intensidad de radiación, la tasa de aumento de la fotosíntesis disminuye hasta que la producción de oxígeno alcance un nivel constante, una especie de límite de saturación. A partir de este punto, la producción de oxígeno fotosintético no aumentará, así la radiación solar aumente. Para bajas intensidades de luz, la luz es un factor limitador en la producción de oxígeno; en cambio, para altas intensidades de luz, durante varias horas de sol en día claro, la temperatura es el factor que favorece la producción de oxígeno. (Mendonça, 2.000)

Las lagunas facultativas dependen de la radiación solar, la cual varía principalmente con la latitud. Además, otro factor significativo es la temperatura atmosférica. Las nubes y la nubosidad reducen la luz disponible en alguna medida, pero como ya se ha enfatizado, la luz solar directa no es esencial. La cantidad de luz solar disponible ayuda a determinar el área y la profundidad necesaria para una operación adecuada. La energía utilizada por las algas proviene principalmente de la parte visible del espectro de radiación solar, en particular entre longitudes de onda o color de 4.000 a 7.000 angostroms. Sólo 2 a 7% de esa radiación solar visible es utilizado por las algas para acelerar la fotosíntesis, sin necesitar de una exposición continua a la energía solar. Para muchas algas, una intensidad mayor que 20.000 ergs/cm².s (41,3 cal/ cm².d) afecta adversamente su crecimiento. Buenas condiciones de crecimiento de algas y de dispersión de oxígeno ocurren en los primeros 60 centímetros de profundidad. (Mendonça, 2.000)

La capacidad calorífica del agua es muy grande, es decir se requiere mucho calor para calentar y mucho frío para enfriarla. La capacidad calorífica del agua o calor específico, o cantidad de calor requerido para elevar a 1 gramo de agua un grado centígrado de temperatura, a presión atmosférica, es de 1 cal/g °C o 4.186 J/g °C. (Romero, 1.999)

I.4.5.- Evaporación

La evaporación combinada con la infiltración a través de una laguna con un fondo permeable determina la reducción de caudal afluente y, en casos extremos, puede hacer que el caudal del efluente sea nulo. El balance hídrico se presentó anteriormente en la ecuación 24. (Mendonça, 2.000)

La evaporación es una pérdida de agua que genera una mayor concentración de sustancias contaminantes, aumentando la salinidad del medio. El sustrato concentrado por encima del valor determinado puede dar como resultado salinidad perjudicial para el equilibrio osmótico en las paredes celulares de los microorganismos y, en consecuencia, para el equilibrio biológico. (Mendonça, 2.000)

Del examen climatológico: temperatura, precipitación y evaporación disponibles en Brasil, se verifica que la influencia de la evaporación en la eficiencia del funcionamiento de las lagunas puede considerarse despreciable, a excepción de las regiones calientes y semiáridas localizadas en el noreste. (Mendonça, 2.000)

Who y Emro (1.987). Suponen que para efectos de diseño, 10% del volumen de la laguna facultativa se evapora. (Mendonça, 2.000)

I.5.- Biología del Proceso.

Proceso Anaerobio; la degradación de la materia orgánica la realizan las bacterias acetogénicas y metanogénicas. Las primeras convierten los compuestos orgánicos complejos en moléculas orgánicas más simples a través de una degradación ácida y los principales productos son el ácido acético (en mayor proporción), ácido propiónico ácido butírico y gas metano, entre otros. El ácido acético es el sustrato para la acción de las bacterias metanogénicas que lo convierten en metano y dióxido de carbono.

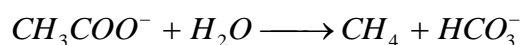
Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a los cambios de temperatura y pH, así como al oxígeno molecular, pues son organismos estrictamente anaerobios. (Mendonça, 2.000)

El proceso anaerobio depende del equilibrio entre las bacterias formadoras de ácidos orgánicos y las formadoras de metano y de las condiciones del medio: nutrientes

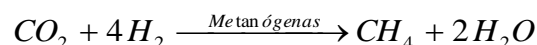
suficientes; ausencia de oxígeno disuelto; ausencia de sustancias tóxicas, temperatura en el intervalo mesofílico 10 a 40 °C y pH entre 6,5 y 7,6. (Romero, 1.999)

Algunos mecanismos típicos de formación de metano son: (Romero, 1.999)

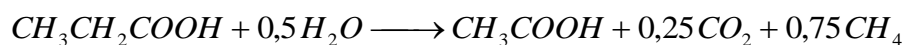
- Descomposición de ácido acético



- Reducción de CO₂



- Descomposición de ácido propiónico



- Descomposición de ácido fórmico



- Descomposición de metanol



- Descomposición de metilaminas



Proceso Facultativo; las bacterias predominantes responsables de la oxidación son *Pseudomonas* spp y *Alcaligenes* spp, convierten el material orgánico en dióxido de carbono, amonio y fosfatos.

La existencia de nutrientes (NH₄⁺ y PO₄⁻³) proporcionan un ambiente favorable para que se desarrollen las poblaciones de algas, y a través de la fotosíntesis genera gran cantidad de oxígeno disuelto. Este oxígeno está disponible para que las bacterias aerobias continúen con la oxidación de la materia orgánica, estableciéndose así la relación mutua entre algas y bacterias.

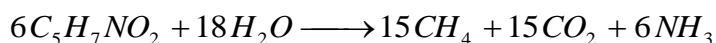
Sin embargo, algunos géneros de algas son capaces de metabolizar directamente materia orgánica y, también hacer fotosíntesis; este tipo de metabolismo restringido a algunos pocos microorganismos se denomina mixotrofia. ^(Mendonça, 2.000)

Existe una fina capa de lodo en el fondo de las lagunas facultativas que reciben aguas residuales crudas, donde se realiza digestión anaerobia con producción de gas carbónico (CO₂) y metano (CH₄). ^(Romero, 1.999)

La oxidación bioquímica del metano requiere grandes cantidades de oxígeno:



La digestión anaerobia de la biomasa bacteriana sedimentada puede representarse así:



I.5.1.- Las Algas como Factor de Influencia en una Laguna de Estabilización.

Las algas son el grupo más diversificado de microorganismos presentes en las lagunas. Son responsables de la generación del oxígeno molecular que mantiene la aerobiosis del ambiente y de las concentraciones de sobresaturación de oxígeno.

En los ambientes acuáticos, las variaciones de la biomasa y de la diversidad del fitoplancton son respuestas a las modificaciones de la calidad físico-química y biológica del agua.

El estudio comparativo de los géneros y especies de algas de lagunas de estabilización de diferentes regiones del mundo debe considerar las características de las aguas residuales de cada lugar, la intensidad de la radiación solar y las horas de luz, así como la temperatura, entre otros factores. La diversidad de las algas en lagunas de estabilización estaría más influenciada por la concentración de la materia orgánica que por ciertas características del ambiente de la laguna, como pH, oxígeno disuelto, intensidad luminosa, temperatura, caudal y tamaño del reactor.

El número de géneros de algas encontrados en lagunas de estabilización es limitado. Por lo general, pertenecen a los Phyla Cyanobactrias (algas verde azuladas, actualmente

consideradas como bacterias: ciano bacteris), Chlorophyta (algas verdes), Euglenophyta (los flagelados pigmentados) y Bacillariophyta (las diatomeas).

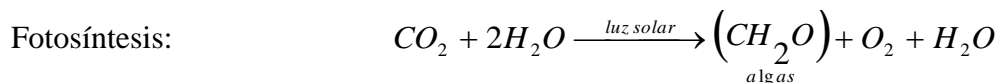
En este tipo de ambiente los géneros más frecuentes no siempre están presentes durante todo el año y pueden variar también con la carga del reactor, con la estación del año, con el clima, con la latitud y con la calidad de las aguas residuales.

La diversidad de las algas de las lagunas de estabilización puede estudiarse a través de la identificación de los microorganismos presentes en muestras recolectadas en el efluente y en la columna de agua. ^(Mendonça, 2.000)

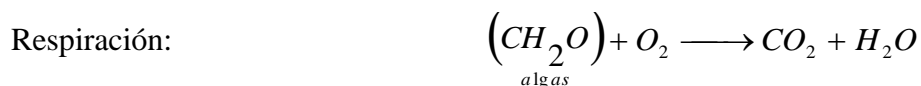
La temperatura determina la sucesión de los organismos predominantes, tanto para bacterias como para algas y otros organismos acuáticos. En general las algas pueden sobrevivir a temperaturas entre 5 y 40 °C, siendo las algas verdes más eficientes para sobrevivir a temperaturas cercanas a 30 y 35 °C. Las bacterias aerobias se mantienen viables en un intervalo de 10 a 40 °C y para las cianobacterias su temperatura óptima oscila entre 35 y 40 °C. ^(Romero, 1.999)

I.5.2.- Fotosíntesis y Respiración

El uso del CO₂ por las algas (ver figura I.11.), en la fotosíntesis, puede conducir a lagunas con pH alto, especialmente en aguas de baja alcalinidad. En otros casos, las algas usan el ión bicarbonato como fuente del carbono requerido para su crecimiento celular y se presentan variaciones altas de pH durante el día. Asimismo, cuando el pH aumenta, las formas predominantes de alcalinidad tienden a ser las de los carbonatos de hidróxidos.



El coeficiente de producción de oxígeno varía de 1,25 a 1,75 g O₂ / g de algas producidas base seca, generalmente se asume el valor de 1,3 g O₂/ g de alga base seca.



Durante el día, las algas pueden producir oxígeno en exceso del requerido para respiración y crear condiciones de sobresaturación y pérdida de O.D. a la atmósfera. (Romero, 1.999)

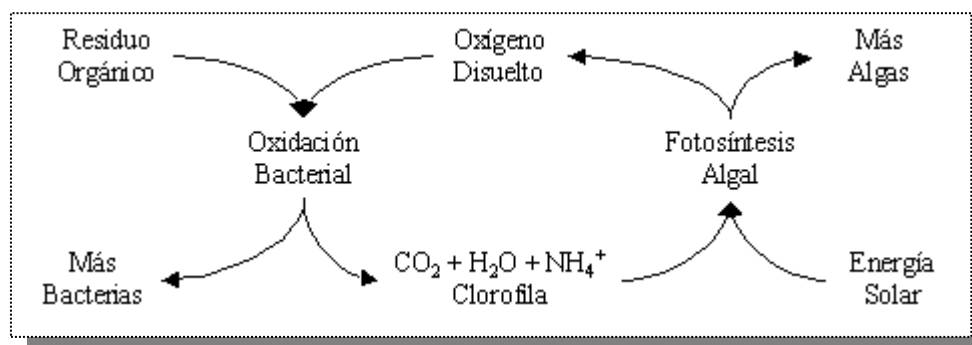


Figura I.11.- Ciclo simbólico fotosintético en lagunas de estabilización. Adoptado de Romero J., 1999

La radiación solar provee luz de longitud de onda corta para la fotosíntesis algas. La energía requerida para fotosíntesis puede obtenerse solamente de luz con longitud de onda entre 400 y 700 nm. Sólo 2 a 7% de esa radiación visible es utilizado por las algas para acelerar la fotosíntesis, sin necesitar de una exposición continua a la energía solar. Para muchas algas, una intensidad mayor que 20.000 ergs/cm².s (41,3 cal/cm².d) afecta adversamente su crecimiento. (Mendonça, 2.000)

Buenas condiciones de crecimiento de algas y de dispersión de oxígeno ocurren a los primeros 60 cm de profundidad. Para el desarrollo de una concentración específica de algas en una laguna, la profundidad permisible no debe exceder tres veces la profundidad de la penetración de la luz. (Mendonça, 2.000)

La cantidad y la calidad de luz que penetra una laguna depende también de la presencia de materia orgánica particulada o disuelta, así como de las características de absorción del agua. Los organismos a su vez contribuyen a dar turbiedad al agua, limitando por tanto la penetración de la luz. Debido a estas restricciones, la fotosíntesis se lleva a cabo principalmente en las capas superiores, por lo que esta zona se conoce como “Zona eufótica”. (Romero, 1.999)

La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión, dispersa la luz, decreciendo la actividad fotosintética en algas, que contribuye a bajar la concentración de oxígeno. La turbidez se mide con un **disco secchi**, esto proporciona una estimación del nivel de turbidez y de penetración de luz en lagunas, tres veces la profundidad de desaparición del disco de secchi es el punto de compensación en la zona eufótica, donde la intensidad de luz es 1% de la intensidad de la superficie. (Odum, 1986)

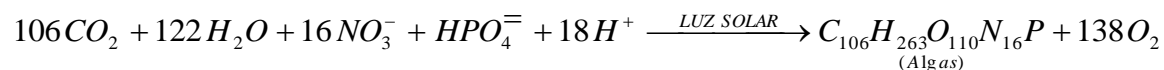
I.5.3.- Nutrientes - Algas

Tanto las bacterias como las algas necesitan de una fuente de nutrientes para crecer y multiplicarse. Varios elementos son necesarios; por ejemplo, el carbono, el nitrógeno y el fósforo se requieren en mayor cantidad. Las aguas residuales domésticas contienen todos los nutrientes necesarios para mantener una comunidad de bacterias y algas. Cuando la materia orgánica es suficiente para un óptimo crecimiento bacteriano, automáticamente también es adecuada para que haya un desarrollo de una población de algas. (Mendonça, 2.000)

De acuerdo con la calidad y tipo de nutrientes, los microorganismos crecen y los metabolizan a una tasa que depende de los factores ambientales. Cuando los nutrientes son limitantes, el crecimiento y la velocidad metabólica son función de la disponibilidad de ellos. (Romero, 1.999)

La relación carbono/nitrógeno/fósforo para un agua residual doméstica es del orden de 11,4:3,7:1, mientras que para el desarrollo y reproducción de las algas esa razón es de 106:15:1. Para las bacterias, una relación aproximada de DBO/nitrógeno/fósforo está cerca de 100:5:1. (Mendonça, 2.000)

El crecimiento algas puede representarse por la siguiente ecuación: (Romero 1.999)



I.5.4.- Biomasa de las Algas

La cuantificación de la biomasa de las algas presentes en la laguna de estabilización se estima por medio de métodos indirectos, que incluyen peso húmedo y seco de los microorganismos en un volumen conocido de muestra, o por métodos directos como la enumeración directa de los microorganismos y la extracción y cuantificación de clorofila “a” (Mendonça, 2.000).

Las microalgas presentes en la laguna que tienen movilidad, contienen de 1.000 a 3.000 µg de clorofila por litro. Por tanto, las lagunas facultativas son o deberían ser verde oscuras. Otros datos varían entre 40 y 30 mg/l (peso seco) o 10^4 y 10^6 por mililitro. (Romero 1.999)

La determinación de la concentración de la clorofila “a” es el método más común en la estimación de la biomasa de las algas. Todas las plantas tienen clorofila “a” y otros pigmentos como clorofila b y c, xantofilas y carotenos. El uso frecuente de las concentraciones de clorofila en estudios del fitoplancton tiene como base la simplicidad y reproducibilidad de la técnica.

El monitoreo de la biomasa de las algas en lagunas de estabilización puede realizarse en muestras recolectadas del afluente final o directamente de la laguna, en el punto y profundidad deseados.

La fluctuación de clorofila “a” está relacionada con el movimiento de las algas a lo largo de la columna de agua y con su estratificación en zonas diferentes por la influencia de la temperatura y la radiación solar fotosintéticamente activa. Este fenómeno de estratificación podría explicar las diferentes concentraciones de la clorofila “a” en muestras del efluente y en la masa líquida. La estratificación es más intensa en las lagunas facultativas que en las de maduración. Cuando las algas se concentran en la capa superior junto al efluente, la laguna adquiere un color verde muy intenso.

El aumento de la carga orgánica de las lagunas causa una reducción de la biomasa de las algas. La disminución de la concentración de clorofila “a” estaría relacionada con otros factores, como el aumento de la concentración de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y

turbidez. El tiempo de retención hidráulico es un factor a considerar, tiempos hidráulicos próximos o menores a los 1,6 días, es un periodo próximo al tiempo de producción de las algas, las cuales pueden ser eliminadas con el efluente, sin haber tenido tiempo suficiente para que ocurra su multiplicación. (Mendonça, 2.000)

I.5.5.- Estratificación de las algas en lagunas de estabilización.

El movimiento de las algas en la columna de agua de las lagunas de estabilización y su distribución vertical, de forma estratificada, es un fenómeno conocido y observado en todo el mundo.

Los factores que controlan o regulan ese desplazamiento y distribución son, principalmente, la temperatura y la intensidad luminosa. Esta última varía con la latitud, con las horas del día (variación del fotoperiodo), etc. Durante el día, algas como la Euglena rotífero son capaces de moverse en la masa líquida y seleccionar aquella profundidad donde la luminosidad sea más adecuada para realizar su fotosíntesis.

König (1984) estudió la estratificación de las algas en lagunas poco profundas, y mostró que este fenómeno es más evidente en lagunas facultativas, que en lagunas de maduración. En el primer tipo de lagunas predominaron las algas flageladas (ex Euglenas spp., Chlamydomonas spp. y Pyrobotrys spp.), que se mueven libremente en la columna líquida. En este estudio quedó claro que el desplazamiento de las algas en las lagunas facultativas y su estratificación en la masa líquida son una respuesta a factores externos. El modelo teórico se describe de la siguiente manera:

1. La ausencia de estratificación en el inicio de la mañana (5-6 horas) y su gradual destrucción al anochecer (17-18 horas) indicaron que las algas flageladas se mueven en respuesta a la luz.
2. la baja intensidad luminosa induce a las algas flageladas movimientos fototácticos positivos (en dirección hacia la luz), y las altas intensidades luminosas causan una respuesta negativa de las algas, que se alejan de la luz.

3. la intensidad luminosa al amanecer es muy baja para permitir modificaciones en el desplazamiento de las algas, y este comportamiento explicaría la distribución uniforme de las algas, que emigran o ascienden hacia las capas más superficiales del agua.
4. Entre las 10 y las 14 horas, la superficie de la laguna recibe la mayor intensidad de luz, que induce el alejamiento de las algas de la capa superior, hasta una profundidad más adecuada para su actividad fotosintética.
5. A partir de las 16 horas se presenta una emigración de las algas flageladas en dirección al fondo de la laguna, donde permanecen hasta el día siguiente, cuando se repite el fenómeno descrito.

La estratificación de las algas en la laguna facultativa es un fenómeno diario y puede causar la aparición de altas concentraciones de algas en el afluente, lo cual aumenta también los valores de DBO_{5,20}, DQO Y SS.

En lagunas de maduración o de pulimento, la estratificación no es evidente como en las lagunas facultativas, porque en ellas la distribución de las algas (medida a través de la clorofila “a”) es más uniforme y varía muy poco durante el día. ^(Mendonça, 2.000)

Toda la información expuesta anteriormente sirve como marco referencial para facilitar la discusión de los resultados obtenidos para los diferentes muestreos realizados en la laguna facultativa.

Capítulo II,
Antecedentes

CAPITULO II

II.- ANTECEDENTES

En la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas se han efectuado un gran número de estudios, los cuales servirán como marco de referencia para la caracterización de la laguna facultativa. Entre los puntos más resaltantes que se tomarán en cuenta están las características y calidad del agua a tratar, las condiciones requeridas en el efluente y el comportamiento hidráulico asociado a la laguna facultativa. A continuación se presentan:

II.1.- Características del Afluente ^(Escalona, 2.000)

El Colector Marginal Izquierdo Río Valle (CMIRV) se extiende desde el sector Las Mayas y recoge las aguas residuales de los sectores de Coche, Zona Presidencial N° 2, Delgado Chalbaud, Jardines del Valle, Cerro Grande, Longaray, Zamora, San Antonio del Valle, San Andrés, Los Rosales, Las Acacias y el Valle Abajo. Todos los sectores mencionados se reúnen en cuatro parroquias: Coche, El Valle, Santa Rosalía y San Pedro, de las cuales quedan excluidos los Barrios: Metropolitano, Hueco Loco, Nuevo, Viento Fresco y Vengas en la Parroquia Coche; el sector El Cementerio y los Barrios: Los Alpes y Villa Zóila ubicados en la Parroquia Santa Rosalía; toda la zona militar de Fuerte Tiuna localizada en la Parroquia El Valle; y los sectores Santa Mónica y Los Chaguaramos en la Parroquia San Pedro. Para ese momento la población total servida por el CMIRV era 163.992 habitantes para la fecha. La actividad de mayor desarrollo en la región es la comercial y no existen industrias significativas en la misma.

Se tiene que las características físico-químicas de las aguas conducidas por el CMIRV determinadas por los métodos establecidos en el “*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*” (APHA-AWWA-WEF (1.995)), aplicados a muestras en los periodos comprendidos entre el 11 de abril al 28 de mayo y el 14 de junio al 23 de julio de 2.000 y los valores de los parámetros físico-químicos, se ubicaron por

debajo del rango medio reportado por *Metcalf & Eddy, 1.991*. El aporte másico unitario de la $DBO_{5,20}$ fue 35 g/hab.d, el cual se encuentra por debajo de los encontrados en las publicaciones. El caudal promedio experimental se determinó en 574 l/s y el valor de caudal teórico en 532 l/s.

La caracterización del agua residual del CMIRV realizada se presenta en la tabla II.1, que resume las propiedades físico-químicas:

Tabla II.1. Resumen de los Análisis Físico-Químicos

ANÁLISIS	Muestra Compuesta a 25-04-00	Muestra Compuesta 10-05-00	Muestra Compuesta a 19-07-00	Promedio
Sólidos totales (mg/l)	582	573	540	565
Sólidos fijos (mg/l)	284	270	263	272
Sólidos volátiles (mg/l)	298	303	277	293
Sólidos disueltos totales (mg/l)	382	388	372	381
Sólidos disueltos fijos (mg/l)	250	249	238	246
Sólidos disueltos volátiles (mg/l)	132	139	134	135
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	200	185	168	184
Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	37	40	42	40
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	163	145	128	145
$DBO_{5,20}$ total (mg/l)	114	119	110	114
$DBO_{5,20}$ soluble (mg/l)	31	43	-	25
DQO total (mg/l)	274	286	279	280
Nitrógeno total (mg N/l)	17,00	13,62	13,33	15

Fuente: Escalona, 2.000

II.2.- Características del Efluente. (Gaceta Oficial N° 5.021 Extraordinario 1.995)

Para la caracterización de la laguna facultativa se tiene que tomar en consideración el cumplimiento de las normativas ambientales según la Gaceta Oficial N° 5021 Extraordinario en el decreto 883, para la descarga de aguas residuales, presentadas en la tabla II.2:

Tabla II.2. Parámetros Físico-Químicos del Efluente

Parámetros	Gaceta Oficial
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	80
Sólidos sedimentables (ml/l)	1
DBO _{5,20} total (mg/l)	60
DQO total (mg/l)	350
Nitrógeno total (mg N/l)	40
Fósforo total (mg P/l)	10

Fuente: Gaceta Oficial N° 5021 Extraordinario (Decreto 883), 1.995.

II.3.- Experiencias Previas en Laguna Facultativa

Se han realizado diversos estudios en las lagunas de estabilización ubicada en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) U.C.V. A continuación se presentan algunos de los trabajos más recientes:

II.3.1.- Ramírez y Regardiz (1.991)

En este trabajo se evaluó el comportamiento hidráulico de las lagunas aerobia y facultativa operando en serie. Para la laguna facultativa las condiciones de carga hidráulica fueron 3,29 MLD/ha a 7,35 MLD/ha con cargas orgánicas asociadas en un rango de 498 a 1.154 Kg DBO_{5,20} /ha.d, la laguna fue capaz de producir remociones de DBO_{5,20} mayores al 70%, considerando la fracción soluble en el efluente. También se observó la remoción de materia orgánica en términos de DQO en el orden del 50%, y cuando se evalúa la eficiencia considerando la fracción soluble en el efluente, esta alcanzó hasta 80% obteniéndose los valores más altos para la carga de 5,02 MLD/ha; dicho comportamiento se atribuyó a la presencia de material algáceo en el efluente del sistema.

Aun cuando se aplicaron altas cargas orgánicas los valores obtenidos para DBO_{5,20} soluble y DQO en el efluente del sistema de lagunas (facultativa-aerobia) cumplieron con los requerimientos establecidos por la normativa venezolana para descarga en cuerpos de aguas superficiales.

Para la determinación del patrón de flujo se procedió a realizar el estudio de trazadores mediante la técnica estímulo-respuesta utilizando como trazador la fluoresceína sódica. La inyección de los trazadores se efectuó luego de fijadas las condiciones de operación y una vez determinados los parámetros físico-químicos en la entrada y salida de cada laguna. A continuación se presentan las principales conclusiones:

Las unidades de tratamiento presentan una condición de flujo disperso, considerándose a la facultativa como completamente mezclada y a la aerobia como parcialmente mezclada.

Se consideró que de los cuatro métodos utilizados para la determinar el número de dispersión, el más apropiado fue la técnica de variación de Levenspiel, ya que se basa en el estudio local de la curva C.

Sus resultados confirman la capacidad de las lagunas de estabilización de operar eficientemente con altas cargas orgánicas produciendo efluentes que satisfacen, en términos de DBO_{5,20} soluble y DQO, los criterios establecidos por la normativa venezolana vigente para las descargas en cuerpos de aguas superficiales.

Los valores de los parámetros adimensionales de la curva C y F obtenidos en este estudio se encuentran en las tablas II.3a y II.3b respectivamente.

Tabla II.3a. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a partir de la Curva C para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.

		PARÁMETROS HIDRÁULICOS			
Laguna	Carga hidráulica (MLD/ha)	θ_c	Vm	Θ_{pf}	d
Aerobia	2,08	0,68	0,42	0,57	0,81
Facultativa	7,35	0,53	0,51	0,66	*

Fuente: Ramírez y Regardiz 1.991.

(*): Este es un método iterativo en el cual $\sigma > 0,992$ no permite la convergencia a un valor de dispersión.

Donde:

θ_c : relación del tiempo medio de retención, adimensional.

V_m : fracción del volumen considerado como espacio muerto (adimensional).

θ_{pf} : fracción de desviación del flujo pistón (adimensional).

d : índice de dispersión.

Tabla II.3b. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva F para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.

PARÁMETROS	CARGA HIDRÁULICA (MLD/ha)	
	2,08	7,35
	Laguna Aerobia	Laguna facultativa
Flujo pistón (%)	3	**
Mezcla completa (%)	97	**
Volumen muerto (%)	3	**
Volumen efectivo (%)	97	**

Fuente: Ramírez y Regardiz 1.991.

** Estos parámetros no pudieron ser determinados debido a que la pendiente de la recta es diferente a la correspondiente al patrón de flujo mezcla completa pero el grafico $\log(1-F(t/t_0))$ vs t/t_0 indica la presencia de espacios muertos a pesar de que $\theta = 1$.

II.3.2.- Espinoza (1.995)

El objetivo principal del estudio fue seleccionar, diseñar, construir y evaluar los dispositivos de entrada y salida de las lagunas aerobia y facultativa de la P.E.T.A.-U.C.V. Para ello se seleccionaron, según las características particulares de las lagunas, dos modelos de dispositivos de entradas múltiples y un modelo de vertedero de crestas dentadas de sección transversal rectangular. Luego de instalados los dispositivos, se procedió a realizar el estudio con trazadores con la finalidad de determinar el patrón de flujo existente en las

unidades de tratamiento utilizando para ello la técnica de estímulo-respuesta empleando como trazador la fluoresceína sódica.

Durante la evaluación, la laguna aerobia operó con una carga hidráulica de 5,66 MLD/ha y la facultativa 7,32 a 8,58 MLD/ha, obtenidas mediante la alimentación al sistema con *agua clara*, pudiéndose comprobar bajo estas condiciones que la fluoresceína sódica presenta pérdidas de su característica fluorescente por fotosensibilidad a los efectos de la radiación solar, insolación y lluvia, entre otros factores ambientales.

Los parámetros hidráulicos adimensionales obtenidos en esta experiencia se muestran en las tablas II.4a y II.4b. El análisis del número de dispersión indica que los sistemas estudiados muestran una condición de flujo disperso, pudiéndose clasificar como parcialmente mezclado.

Tabla II.4^a. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva C para las Lagunas de Estabilización de la P.E.TA.

		PARÁMETROS HIDRÁULICOS			
Laguna	Carga hidráulica (MLD/ha)	θ_c	V_m	Θ_{pf}	d
Aerobia	5,66	0,44	0,56	0,53	0,54
Facultativa	7,32-8,58	0,50	0,50	0,43	0,46

Fuente: Espinoza, 1.995.

donde:

θ_c : relación del tiempo medio de retención, adimensional.

V_m : fracción del volumen considerado como espacio muerto (adimensional)..

Θ_{pf} : fracción de desviación del flujo pistón (adimensional).

d: índice de dispersión.

Tabla II.4b. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva F para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.

PARÁMETROS	CARGA HIDRÁULICA (MLD/ha)	
	5,66	7,32-8,58
	Laguna Aerobia	Laguna facultativa
Flujo pistón (%)	41	23
Mezcla completa (%)	59	77
Volumen muerto (%)	51	39
Volumen efectivo (%)	49	61

Fuente: Espinoza, 1.995.

Para la carga de operación a las que fueron sometidas las lagunas, se presentó una disminución del nitrógeno orgánico y amoniacal, del mismo modo ocurrió con los valores de nitratos. Estos resultados se pueden considerar como indicativos de que el nitrógeno en sus diferentes formas, sufrió transformaciones durante el proceso de estabilización del líquido residual en estas unidades de tratamiento. Además, se observó en los resultados una remoción del fósforo total en el sistema de 23%, siendo en forma parcial de 11% y 14% para la laguna facultativa y aerobia, respectivamente. Esto sugiere que el contenido de fósforo total en las lagunas sufrió transformación, explicando esta posibilidad a la incorporación de este nutriente al tejido celular de las algas.

Para establecer la relación entre el comportamiento hidráulico y la eficiencias de remoción se determinaron los porcentajes de remoción de materia orgánica para una carga hidráulica de 8,58 MLD/ha (1.673 Kg DBO_{5,20} /ha*d) en la laguna facultativa y de 5,66 MLD/ha (538 Kg DBO_{5,20} /ha*d) en la laguna aerobia y los mismos confirmaron el aumento de la capacidad de estas unidades para soportar las altas cargas al introducir mejoras en el comportamiento hidráulico, produciendo un efluentes que satisface los criterios establecidos por la normativa venezolana vigente para la descarga en cuerpos de aguas superficiales.

Entre las recomendaciones más importantes del trabajo realizado por Espinoza, se encuentra la evaluación del comportamiento hidráulico de las lagunas de estabilización operando con agua residual, con el fin de establecer su patrón de flujo y se sugiere no utilizar la fluoresceína sódica como trazador en aguas clara ya que se pierde por fotosensibilidad, recomendando el uso de la Rodamina Wt o isótopo radiactivo, entre otras alternativas de trazadores.

II.3.3.- Figueroa C. y Paz F. (1.998)

El trabajo se fundamentó en el desarrollo y adaptación de una metodología para el uso de un trazador radiactivo en la evaluación del comportamiento hidráulico de las lagunas aerobia y facultativa ubicadas en la P.E.T.A.-U.C.V. Para establecer la aplicabilidad de esta metodología se realizó el análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental, tomando como punto de comparación la utilización de un trazador fluorescente (Rodamina Wt).

La laguna facultativa operó con una carga hidráulica de 8 MLD/ha, asociada a una carga orgánica que fluctuó entre 836 y 1.282 Kg DBO_{5,20} /ha*d. En cuanto a la laguna aerobia los mismos corresponden a 2 MLD/ha y una carga orgánica que varió entre 66 y 125 Kg DBO_{5,20}/ha*d.

Para evaluar el comportamiento hidráulico se aplicó la técnica estímulo-respuesta. Los trazadores fueron añadidos en forma de pulso.

Antes de inyectar los trazadores se verificó estabilidad de ambas lagunas determinando los porcentajes de remoción de materia orgánica en términos de BDO_{5,20} total, DQO total y DQO soluble a muestras instantáneas captadas en el afluente y efluente de las lagunas aerobia y facultativa. Información que permite determinar la posible influencia que pudieran ejercer los trazadores sobre la eficiencia del tratamiento. Como son:

El trazador radiactivo I-131 y el fluorescente Rodamina Wt no afectan la eficiencia del sistema de lagunas de la P.E.T.A-U.C.V. La metodología desarrollada y adaptada en este estudio para el uso del trazador radiactivo I-131 es, desde el punto de vista técnico y

ambiental, apropiado para evaluar el comportamiento hidráulico, con tiempo de retención de 7 días y carga orgánica e hidráulica semejantes a la laguna facultativa. Sin embargo, el utilizar el trazador radiactivo (I-131) resultó más costoso que emplear el trazador fluorescente (Rodamina Wt).

Los resultados obtenidos para la evaluación realizada por Figueroa C. y Paz F. con el I-131, en relación a los parámetros adimensionales de la curva C y F se presentan en las tablas II.5a y II.5b respectivamente.

Tabla II.5a. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a partir de la Curva C para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.

		PARÁMETROS HIDRÁULICOS			
Laguna	Carga hidráulica (MLD/ha)	θ_c	V_m	Θ_{pf}	D
Aerobia	2,08	0,69	0,43	0,53	0,55
Facultativa	7,35	0,66	0,38	0,60	0,97

Fuente: Figueroa C. y Paz F. 1.998.

donde:

θ_c : relación del tiempo medio de retención, adimensional.

V_m : fracción del volumen considerado como espacio muerto (adimensional).

θ_{pf} : fracción de desviación del flujo pistón (adimensional).

d: índice de dispersión.

Tabla II.5b. Parámetros Hidráulicos Obtenidos a Partir de la Curva F para las Lagunas de Estabilización de la P.E.T.A.

PARÁMETROS	CARGA HIDRÁULICA (MLD/ha)	
	2.08	7.35
	Laguna Aerobia	Laguna facultativa
Flujo pistón (%)	11	5
Mezcla completa (%)	89	95
Volumen muerto (%)	20	23
Volumen efectivo (%)	80	77

Fuente: Figueroa C. y Paz F. 1.998.

A continuación se muestran algunos de los trabajos realizados en las lagunas de estabilización ubicada en la Planta de Tratamiento “Maracaibo Sur” del estado Zulia.

II.3.4.- Kwong Ch., Elsa y colaboradores (2.005)

Este trabajo se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Ing. Nerio A. Rosales” específicamente en la laguna facultativa secundaria del mismo, la cual se encuentra ubicada en el sector Rodeo I del Municipio San Francisco, Estado Zulia. El objetivo de este trabajo fue estudiar la variación del oxígeno disuelto, pH y temperatura a diferentes profundidades así como en la superficie de la laguna facultativa, de tal forma establecerse las zonas aeróbicas y anóxicas de la laguna.

Para su estudio se dividió en cuadrícula de área correspondiente al 0,25% del área total de la laguna (16 ha). Este valor fue seleccionado aleatoriamente y de esta manera se ubicaron en total 482 sitios de muestreos, en estos puntos se tomaron mediciones, a tres niveles diferentes: superficie (15cm de la superficie), intermedio (mitad de la profundidad total) y fondo (15cm encima del fondo).

Los resultados obtenidos permitieron observar que la temperatura disminuyó desde la superficie hasta el fondo, siendo válido para días muy soleados y para pocos soleados, así

mismo ratifican que las aguas superficiales son más cálidas que el fondo, observándose una termoclina o capa de agua que separa dichas zonas superior e inferior (ver tabla II.6).

Tabla II.6. Valores promedio de temperatura para algunas progresivas en los diferentes niveles de la laguna según incidencia solar.

PROGRESIVA	INCIDENCIA SOLAR	SUPERFICIE (°C)	INTERMEDIO (°C)	FONDO (°C)
380	Muy soleado	31	30	29,6
420	Dia soleado	31,4	30,6	30,3
300	Poco soleado	29,7	29,5	29,3

Fuente: Kwong Ch., Elsa y Colaradores. 2.005.

A medida que el agua avanza en la laguna, se registró una disminución de la temperatura de superficie que puede estar asociada con la evaporación del agua. Además se obtuvo mayor concentración de oxígeno disuelto en la superficie entre 0 y 14 mgO₂/l y para la zona intermedia y fondo se obtuvo un rango de 0 y 1,5 mgO₂/l. En cuanto a la distribución de pH se encontró variaciones significativas con la profundidad. Para la superficie se reportó un rango de 6,8 – 7,7 y para la zona intermedia de 6,7 – 7,4. También se observó que a medida que avanza el tratamiento la concentración de oxígeno disuelto aumenta, la distribución de oxígeno corresponde a la distribución de clorofila, exhibiendo un movimiento del tipo flujo pistón y el comportamiento del pH corresponde con la actividad de las algas.

II.3.5.- Vargas, Luís y Colaboradores (2.004)

El objetivo fundamental de esta investigación fue estudiar el efecto de las microalgas sobre la remoción del nitrógeno presente en la laguna facultativa de la planta de tratamiento de aguas residuales Maracaibo Sur.

En este trabajo se realizaron 28 muestreos en un lapso de tres meses consecutivos. Las muestras se tomaron en forma aleatoria simple a la entrada y salida de la laguna facultativa; se realizaron mediciones “in situ” de temperatura, pH y oxígeno disuelto y a nivel de laboratorio los parámetros químicos (nitrógeno total Kjeldahl, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato) y los parámetros microbiológicos (clorofila), en todos los casos se siguió la metodología descrita por el Standard Methods.

Los resultados obtenidos indicaron que se obtuvieron remociones de nitrógeno total Kjeldahl 21,61%; nitrógeno amoniacal 36,42%; nitrito 95,05% y nitrato 81,77%. Referente a los parámetros microbiológicos, la clorofila presentó una concentración máxima de 557,86 mg/m³ y en cuanto al conteo e identificación de microalgas, se observó una gran variedad de algas pero se obtuvieron en mayor proporción las Cyanophytas 54%, Clorophytas 28% y otros géneros con 18%. En general las microalgas ejercieron un efecto positivo sobre la remoción del nitrógeno que se encontraba presente en la laguna facultativa de esta planta de tratamiento.

Capítulo III, Metodología

CAPITULO III

III.- METODOLOGÍA

En este capítulo se estructura la metodología seguida durante el estudio de la Caracterización del Comportamiento de la Laguna Facultativa de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas U.C.V.

La laguna facultativa se operó a diferentes cargas hidráulicas asociadas a tres cargas orgánicas establecidas, con la finalidad de evaluar el balance hídrico, la eficiencia del sistema y el régimen hidráulico.

Inicialmente y para cada una de las condiciones de operación establecidas, se procedió a la experiencia con el trazador, mediante la inyección instantánea de Rodamina WT a la entrada de la laguna, la cual fue captada continuamente a la salida del sistema. Una experiencia paralela a ésta fue la recolección de muestras de manera discreta, en un conjunto de puntos dentro de la laguna distribuidos espacialmente, lo cual se realizó varias veces al día de acuerdo con el tiempo de retención teórico, así mismo se registraron las condiciones meteorológicas de interés y el monitoreo del flujo de entrada en el momento del muestreo este último se realizó dos veces por semana. De la curva de distribución de tiempos de residencia se obtiene un conjunto de parámetros hidráulicos que caracterizan a la laguna; eficiencia de la laguna con base a la remoción de materia orgánica y la verificación del caudal afluente, mientras que para la experiencia discreta se obtiene una distribución espacial del trazador a lo largo de la laguna; la ubicación de los espacios muertos y la trayectoria de los cortocircuitos. Así mismo, se establece la influencia de los parámetros meteorológicos sobre el comportamiento hidráulico.

Una vez concluida la determinación de los parámetros hidráulicos, se llevó a cabo la parte correspondiente a lo físico-químico, para ello se garantizó la estabilidad en la unidad a evaluar para asegurar que los valores obtenidos para los diferentes parámetros correspondan a las condiciones de operación establecidas. Una vez que se obtuvo la estabilidad en la laguna se procedió a determinar los parámetros físico-químicos para la

muestra compuesta, como también para las muestras captadas a lo largo de la laguna. Paralelo a esto se realizó un registro de los parámetros meteorológicos de interés asociado a las muestras tomadas dentro de las lagunas. Todo esto con el fin de establecer la eficiencia de remoción del material carbonáceo y la remoción de nutrientes, así como la influencia de los parámetros meteorológicos en relación con los físico-químicos.

Para el cálculo del balance hídrico, se efectuó el monitoreo de los factores meteorológicos (evaporación y precipitación) considerando el tiempo de retención del sistema. Todo esto con el propósito de determinar la variación del caudal afluente a consecuencia de la evaporación y precipitación. Además para determinar la presencia o no de infiltración y/o percolación en la unidad en estudio.

A continuación se presenta con detalle el estudio realizado en la laguna facultativa.

III.1.- Condiciones de Operación

Con el propósito de evaluar el comportamiento hidráulico en la tabla III.1 se resumen las condiciones de operación.

Tabla III.1. Condiciones de Operación aplicadas en la Laguna Facultativa ^a

Carga	1	2	3
Carga Hidráulica (MLD/ha)	2,0	4,5	6,5
Caudal (l/min.)	10	22	32
Tiempo de retención teórico(d)	6,6	3,1	2,0

^a La profundidad de trabajo para la laguna facultativa es de 1,37 m, el área superficial de 70,5 m²

III.2.- Estabilidad de la Laguna

La estabilidad de la laguna facultativa, necesitó del control y supervisión del caudal de operación dos veces por semana por un período aproximado de 20-30 días, contado desde el momento que se fijó un caudal determinado, luego, se monitoreo la DBO _{5,20} en el

afluente y efluente de la laguna, dos veces por semana tomando muestras instantáneas, de tal forma que el porcentaje de remoción obtenido a partir de este parámetro se mantuviera en el tiempo, estableciendo con ello su condición de estabilidad, para evaluar la unidad.

III.3.- Determinación de Parámetros Hidráulicos en la Laguna

Siguiendo la metodología desarrollada por Figueroa y Paz (1.998):

III.3.1.- Ubicación de la Inyección, Detección y Medición del Trazador

La inyección del trazador se realizó a través de un tapón de goma, ubicado en la tubería de alimentación de la laguna, a pocos centímetros del borde de la misma. Ver figura III.1., la cantidad de masa de trazador inyectada por carga esta reflejada en el apéndice G.



Figura III.1. Laguna Facultativa de la P.E.T.A.

La detección del trazador se efectuó conectando una tubería desde una bomba, que está en la tanquilla a la salida de la laguna, al fluorometro.

La medición se realizó continuamente, con un fluorometro de campo Turner Designs Modelo 10-AU-005. El dispositivo, fue calibrado previamente de acuerdo con el procedimiento del manual. Este permitió guardar la lectura realizada a diversos intervalos de tiempo. En este trabajo, las lecturas fueron efectuadas cada 5 minutos, posterior a esto

los datos fueron descargados hacia una computadora para los diferentes cálculos de los parámetros hidráulicos que se detallan en las tablas III.2a y b.

Tabla III.2a. Parámetros que se Obtienen a partir de la Curva C

Desviación del Flujo Pistón	θ_{pf}
Tiempo de retención medio adimensional	θ_c
Volumen muerto adimensional	V_m
Volumen efectivo adimensional	V_e

Tabla III.2.b. Parámetros que se Obtienen a partir de la Curva F

Fracción de flujo considerado como pistón	P
Fracción de flujo considerado como mezcla completa	FMC
Volumen muerto adimensional	V_m
Volumen efectivo adimensional	V_e
Otros Parámetros	
Dispersión	d
Caudal	Q
Relación t_i/t_o (tiempo inicial/tiempo de retención teórico)	θ

^bTiempo inicial; es el tiempo que transcurre desde el momento de inyectar el trazador y el instante en que se comienza a detectar el trazador en el efluente de la laguna. Adaptado de De Freitas A., (2003).

III.3.2.- Perfil de Flujo dentro de la Laguna.

Las muestras de trazador a lo largo del sistema fueron captadas puntualmente en recipientes de 300 ml, para cada una de las filas (E, M, S) las muestras fueron tomadas de forma simultanea para luego procesarlos en el fluorometro en forma discontinua, la configuración de la matriz está distribuida de la siguiente manera (ver figura III.2.). Las filas E, M y S equidistan 3,8 m y Las filas E y S están ubicadas a 3,8 m del afluente y

efluente respectivamente, los puntos en cada fila equidistan 1,2 m y los puntos extremos están a 1,2 m del borde de la laguna. Además, en las esquinas de la salida de la laguna se ubicaron los puntos C considerados como posibles cortocircuitos. La sección transversal esta conformada por tres puntos, estos puntos ubicados a 0,18 m., 0,54 m., y 1 m del espejo superficial, asociados al nivel del disco secchi para el primer valor; tres veces el nivel del disco para el segundo valor; y 1 m arbitrariamente para el último valor, correspondiendo todos a la medición previa realizada para la primera carga de operación.

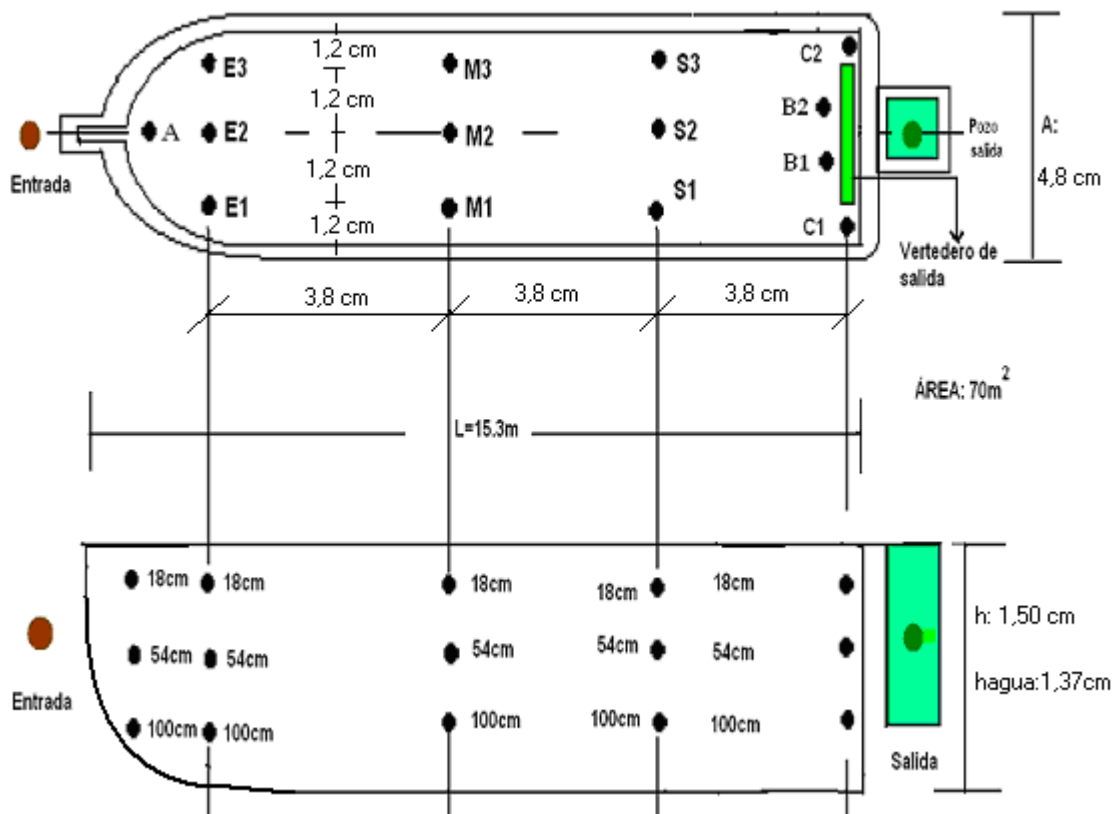


Figura III.2. Distribución espacial de los puntos de muestreo para el análisis discreto del trazador dentro de la laguna.

III.4.- Parámetros Físico-Químicos.

III.4.1.- Parámetros Físico-Químicos de la Laguna Facultativa.

Para la caracterización entrada-salida del sistema, se tomaron muestras instantáneas cada hora, durante 24 horas, estas muestras fueron mezcladas al final del día para así obtener muestras compuestas del afluente y efluente respectivamente, con la cual se realizaron los análisis físico-químicos enumerados en la tabla III.3.

Se realizaron cuatro (4) ensayos de muestreos compuestos entre intervalos de tiempo equivalentes al tiempo de retención del flujo, lo que permitió determinar la eficiencia del sistema entre la entrada y la respectiva salida correspondiente al tiempo de retención; y asimismo, obtener la eficiencia promedio del sistema para los cuatro muestreos compuestos de 24 horas. Las eficiencias consideradas en el estudio fueron en términos de materia orgánica carbonácea y los nutrientes fosforo y nitrógeno.

Tabla III.3. Análisis Físico-Químicos

Parámetros	Nombre del Método y Código con que se Indica al Mismo^C
DBO _{5,20}	Dilución (5210 B)
DBO _{5,20} soluble	Dilución (5210 B)
DQO	Método del Reflujo Abierto (5220 B)
Sólidos totales	Gravimétrico (2540 D)
Sólidos fijos	Gravimétrico (2540 E)
Sólidos volátiles	Gravimétrico (2540 E)
Sólidos disueltos totales	Gravimétrico (2540 C)
Sólidos suspendidos totales	Gravimétrico (2540 B)
Nitrógeno Orgánico	Método Macro-Kjeldahl (4500 N org. B)
Nitrógeno Amoniacal	Paso Preliminar de Destilación (4500 NH-B)
Nitritos	Cromatografía Iónica (4110 B)
Nitratos	Cromatografía Iónica (4110 B)
Fósforo	Preparación (4500 P B), Método del Cloruro Estañoso (4500 P-D)

° Metodología empleada según “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. APHA. AWWA. WEF. 1999. 20th Edition. Washington.

III.4.2. Distribución Espacial a lo Largo de la Laguna Facultativa

Las estaciones de muestreo seleccionadas para la medición de los parámetros físico-químicos, fueron escogidas siguiendo la metodología empleada por De Sousa L; Williams, F; Vitale, O. (1988), donde se demostró la representatividad de los puntos a partir de una evaluación previa en la laguna facultativa. Sin embargo, en este trabajo se utilizó una estación más, para lograr una mayor cobertura a lo largo de la laguna. A continuación se presentan en la figura III.3a:

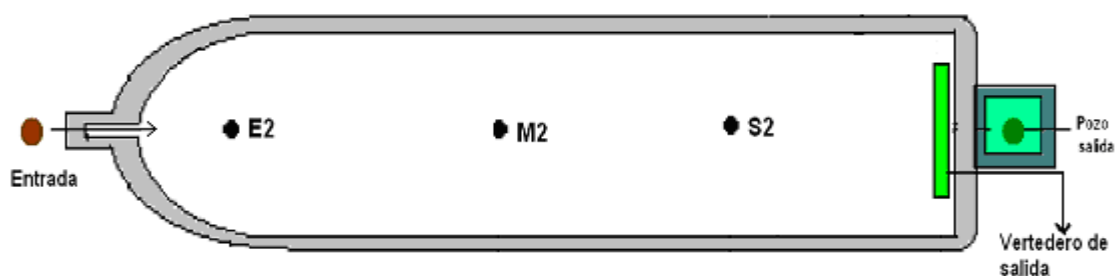


Figura III.3a. Distribución Espacial a lo Largo de la Laguna. Vista Plano en la Dirección del Flujo.

Las estaciones E2, M2 y S2 equidistan 3,8 metros. Las estaciones E2 y S2 están ubicadas a 3,8 metros del afluente y efluente respectivamente. Cada sección transversal intermedia esta conformada por tres puntos, para conocer entre otras cosas la condición aerobia o anaerobia y determinar el perfil vertical. Estos puntos están ubicados a 0,18m, 0,54m y 1m del espejo superficial. Lo anterior se observa en la figura III.3b.

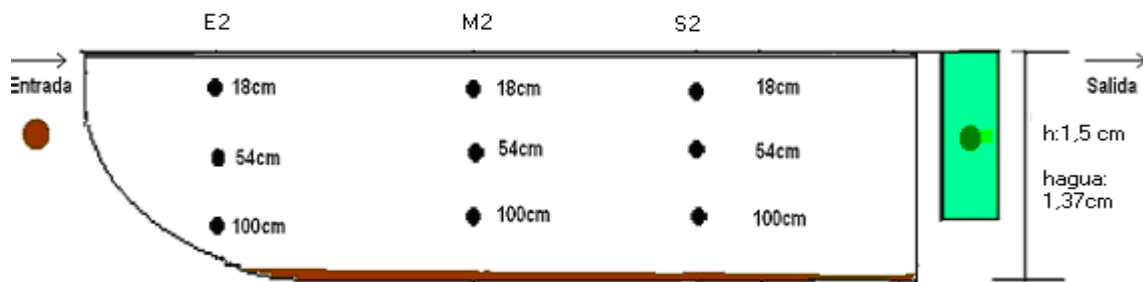


Figura III.3b. Distribución Espacial a lo Profundo de la Laguna. Vista Longitudinal en la Dirección del Flujo.

Se tomaron valores de temperatura, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad, en el afluente, efluente y en varios puntos seleccionados dentro de la laguna facultativa, según esquema de la figuras III.3a y b, mediante un captador de muestra (ver figura III.4), a las siguientes horas: 8:00 a.m., 2:00 p.m., 8:00 p.m., 2:00 a.m., para observar su variación diaria y obtener promedios de dichos parámetros en el afluente y efluente.



Figura III.4. Captador de Muestra de la laguna a 0,18m, 0,54m y 1m de Profundidad.

III.5. Parámetros Meteorológicos

Las condiciones climáticas son de gran importancia porque pueden influir directamente sobre la eficiencia de la laguna. Por tanto, su caracterización se efectuó a través de mediciones de diferentes parámetros.

En la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la UCV se encuentra una estación meteorológica que permite la obtención de los parámetros que se mencionan a continuación: temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, evaporación, precipitación y presión atmosférica.

En la tabla III.4 se detalla cada uno de los parámetros meteorológicos así como el dispositivo utilizado para su medición.

Tabla III.4. Parámetros Meteorológicos y Dispositivos a Utilizar

Parámetros Meteorológico	Dispositivo Utilizado
Temperatura media diaria	Termómetros de temperatura máxima y mínima
Humedad relativa	Higrógrafo
Radiación solar	Actinógrafo
Presión atmosférica	Barógrafo
Evaporación	Tina de Evaporación
Precipitación	Pluviómetro
Dirección del Viento	Veleta
Velocidad del Viento	Anemómetro

III.6. Determinación de Clorofila “a”.

Se ubicaron tres puntos centrales y equidistantes a lo largo de la laguna ver figura III.3 a y b), con profundidades establecidas para cada carga de acuerdo a la visibilidad del disco de Secchi, utilizado para la estimación del nivel de penetración de luz (medida indirecta de la turbiedad del agua) en lagunas (ver tabla III.5). El punto medio de captación fue el triple del valor obtenido por el disco Secchi, ya que se entiende que tres veces la profundidad de desaparición del disco de Secchi es el punto de compensación en la zona

eufótica, donde la intensidad de luz es el 1 % de la intensidad de la superficie. El tercer punto de profundidad se fijó arbitrariamente en 100 cm. a partir de la superficie para cada carga.

Tabla III.5. Profundidades establecidas para cada carga

Carga Hidráulica (MLD/ha)	Profundidad (cm)
	Superficial
2,0	18
4,5	15
6,5	12

Para precisar si las profundidades se modificaban con la hora del día durante la estimación del nivel de penetración de luz, se realizó el mismo procedimiento durante varios días, arrojando el mismo valor en todas las ocasiones, por lo tanto estos valores permanecieron fijos para todo el programa de muestreo para la carga respectiva.

El cálculo de la concentración de clorofila “a” libre de pigmento se realizó de acuerdo a la metodología empleada según “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. APHA. AWWA. WEF. 1999. 20th Edition. Washington.

**Capítulo IV,
Resultados y Análisis**

CAPITULO IV

IV.- RESULTADOS Y ANALISIS

IV.1.- Primera Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.

IV.1.1.- Análisis Hidráulico.

A continuación la figura IV.1, muestra los puntos de muestreo que corresponden al estudio discreto de la trayectoria del trazador en el volumen de la laguna.

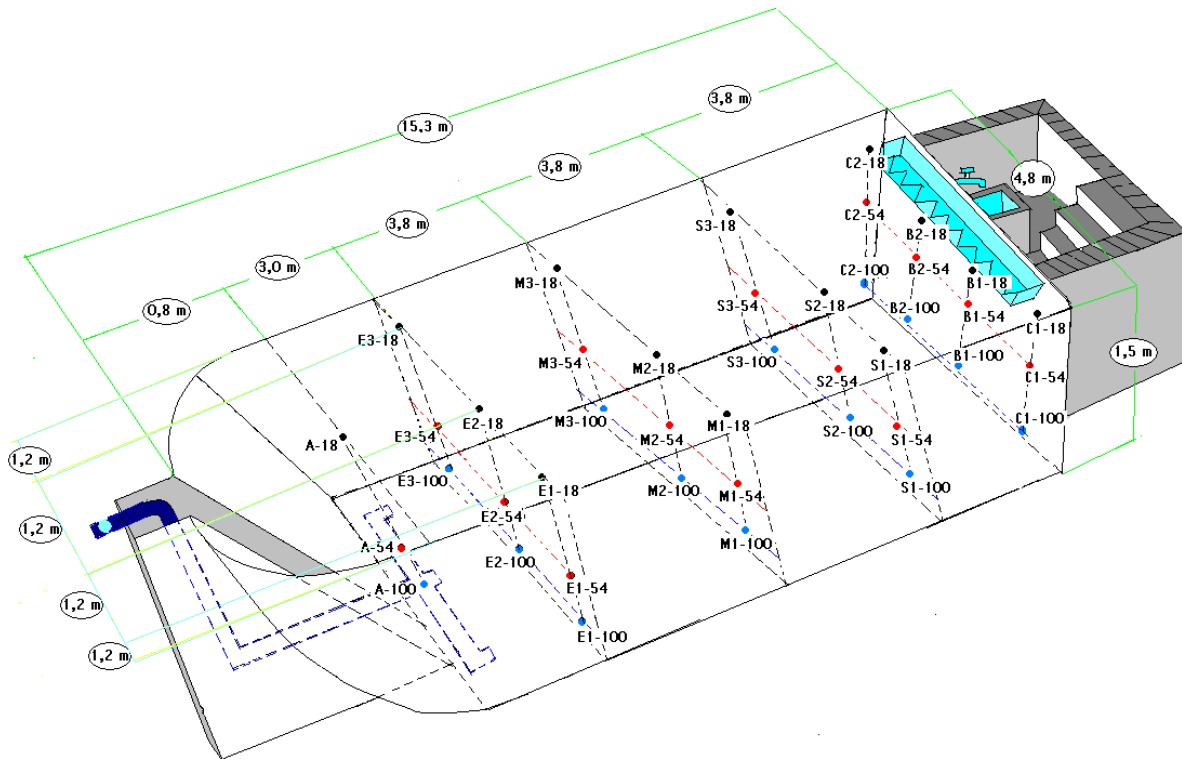


Figura IV.1. Representación tridimensional de los puntos de muestreo en la laguna para el muestreo discreto de trazador.

La interpretación de los resultados está fundamentada en los perfiles longitudinales de concentración de trazador reportados en el apéndice D. Sin embargo, para simplificar el análisis y discusión de los mismos, sólo se presentará en esta sección el perfil longitudinal

central del sistema correspondiente a los diferentes ensayos (esto es solo para ejemplificar como es el comportamiento del flujo).

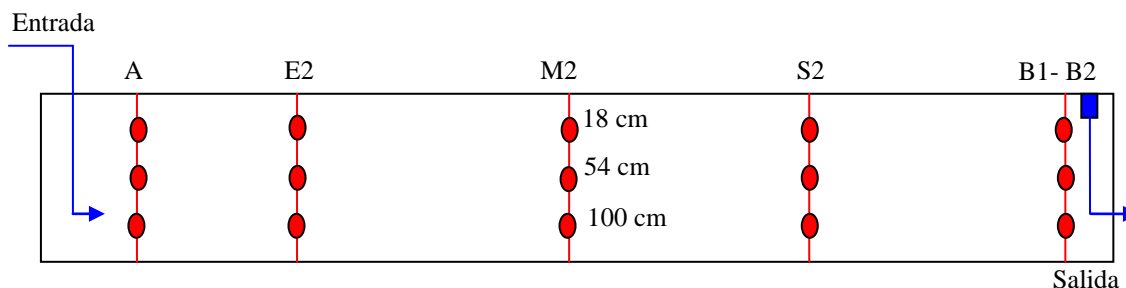


Figura IV.2. Esquema longitudinal central de los puntos de muestreo dentro de la laguna.

La distribución de la concentración de trazador se expresa en ppb (microgramos de rodamina WT por volumen de reactor en litros). Para facilitar la interpretación y análisis de los datos se le asignó color a las diferentes rangos de concentraciones en los perfiles, estableciendo el siguiente criterio: altamente concentrado color rojo, peso asignado >100%; concentrado color fucsia, peso asignado (45-100)%; medianamente concentrado color rosado, peso asignado(10-44)% y poco concentrado color blanco, peso asignado (0-9)%.

El peso en porcentaje asociado a cada grupo de concentración se establece de acuerdo a la siguiente relación: 0,0 ppb representa 0,0% y el máximo valor de concentración del perfil menor a 1000 ppb corresponde a 100%.

Ensayo N° 1 para un tiempo de 30 minutos después de la inyección del trazador:

Tabla IV.1. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min después de la inyección del trazador.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	5	1	4	2	34	57
54	54	1	66	24	255	326
100	>1000	1	41	2	57	75

* Hora de la inyección 12:00 p.m.

* Visibilidad del disco secchi 18 cm; radiación promedio 396 cal / cm² d; carga orgánica 231 Kg DBO/ha.d.

En la tabla IV.1 se observa que para un tiempo después de 30 min de la inyección, el trazador se encuentra moderadamente concentrado a la salida de la laguna, si consideramos el tiempo de retención promedio del afluente (5,4 días), entonces el sistema presenta alta velocidad de flujo. La velocidad del afluente a la entrada del sistema es de 397 m/h y es $3,4 \cdot 10^3$ veces más rápida que la velocidad de la masa de agua en la laguna (ver apéndice C). La alta velocidad del afluente confirma que el estrato medio y perfil longitudinal izquierdo (ver apéndice D) de la laguna presenta flujo preferencial y este a su vez promueve el cortocircuito.

El cortocircuito hidráulico en la laguna, se forma debido a la corriente ascendente que genera el dispositivo de salida desde el estrato medio, ya que opera por rebose. Sin embargo, no representa una alta fracción del flujo preferencial, los puntos B1 y B2 de la tabla IV.1 ubicados a la salida, muestran que la concentración del estrato medio es, en promedio, 6 veces mayor a la del estrato superior.

Ensayo N° 2 para un tiempo de 5 horas después de la inyección del trazador:

Tabla IV.2. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección del trazador.

Profundidad (cm.)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	31	21	21	15	27	27
54	55	164	135	143	182	239
100	413	104	23	58	92	63

En el punto “A” a la profundidad de 100 cm se observa una zona estancada, la cual está asociada a la penetración del afluente en el volumen de lodo. Después del punto “A”, el estrato inferior no es penetrado significativamente por el afluente ya que el flujo toma como camino preferencial el nivel de profundidad 54 cm.

La concentración de trazador en el estrato superior presenta mal mezclado vertical con el estrato medio, lo que indica que, no todo el flujo del estrato medio asciende a la superficie, entonces recircula, formando turbulencia en el estrato medio, con una marcada

tendencia a difundirse hacia el fondo (dispositivo de entrada ubicado a 105 cm de la capa de agua).

Ensayo N° 3 para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador:

Tabla IV.3. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	172	156	163	164	165	161
54	163	163	166	164	168	167
100	161	167	161	156	170	153

*Concentración promedio experimental en el volumen del sistema 163 ppb.

El perfil muestra un mezclado perfecto en todo el volumen, por lo que, el comportamiento hidráulico del sistema cambió drásticamente después del ensayo N° 2 (aproximadamente a las 6:00 p.m.), permitiendo mayor mezclado del sistema. Esto significa que el sistema es de hidráulica transitoria, durante el día presenta perfiles estratificados y durante la noche un mezclado perfecto. Lo cual se confirma con el análisis los parámetros físico-químicos que se exponen más adelante.

El mayor aporte de material orgánico desde los estratos inferiores hacia la superficie de la laguna se efectúa durante el mezclado total y es menor durante el día, debido a la estratificación.

Una vez que el trazador se ha mezclado la primera noche, la metodología utilizada para cubrir la trayectoria del trazador ya no aporta mayor información respecto a cortocircuitos y zonas muertas. Sin embargo, ensayos posteriores sólo mostraron la reducción de la concentración en el tiempo.

El análisis cualitativo determinó que la laguna facultativa presenta un comportamiento hidráulico transitorio, entonces los resultados de los parámetros hidráulicos, están asociados a condiciones internas de distribución de flujo que varían en el tiempo, por lo que no deben ser interpretados como una condición estática del sistema. Del estudio hidráulico cuantitativo, el tiempo de retención medio es el único parámetro que se considera cierto, ya que corresponde al tiempo de tránsito de las partículas en el sistema y no una interpretación

de la condición del mismo, todos los demás deben ser descartados. Sin embargo, a continuación se hace una comparación entre los resultados cuantitativos y las características cualitativas del sistema.

Tabla IV.4. Parámetros Hidráulicos. Carga hidráulica 2,0 MLD/ha.

Parámetros Asociados a la Curva C		
Tiempo de retención teórico, (d)	t_0	6,5
Tiempo de retención real, (d)	t	5,4
Tiempo de retención medio t/t_0 , (adimensional)	θ_c	0,83
Desviación del Flujo Pistón, (%)	θ_{pf}	57
Volumen muerto, (%)	V_m	21
Volumen efectivo, (%)	V_e	79
Dispersión, (adimensional)	d	$>10^5$
Parámetros Asociados a la Curva F		
Fracción considerada flujo pistón, (%)	p	30
Fracción considerada mezcla completa, (%)	FMC	70
Fracción considerada como volumen muerto, (%)	V_m	16
Fracción considerada como volumen efectivo, (%)	V_e	84

*Carga Orgánica 231 Kg DBO/ha.d.

El valor del tiempo de retención medio adimensional $\theta_c = 0,83$, coincide con la existencia de cortocircuitos en el sistema, ya que valores de $\theta_c < 1$ implica que el flujo está saliendo del sistema más rápido de lo esperado, ($t = 5,4 < t_0 = 6,5$ d) y también sugiere la presencia de volumen muerto, lo cual fue verificado en las pruebas cualitativas.

El volumen muerto de la laguna es alto y no corresponde a zonas estancadas del sistema, debido a que un aumento en la velocidad de mezclado en el reactor reduce o elimina estas zonas ^(Fogler, 2.000) y las condiciones de la laguna en un ciclo de 24 horas son análogas a este comportamiento, por lo que no es posible su determinación cuantitativa. Sin embargo, la caracterización cualitativa mostró que la capa de lodo en el fondo de la laguna presentó zonas estancadas durante la estratificación del sistema y están asociadas a la masa de mayor densidad y flujos con mayor esfuerzo tangencial debido a la cercanía del suelo. Durante la noche no es posible observar esta característica debido a que el mezclado vertical dispersa homogéneamente el trazador.

La alta dispersión $> 10^5$ es un buen indicativo de las grandes fluctuaciones hidráulicas que presenta la laguna durante los 18,2 días de registro de la concentración del trazador; y de la tendencia al comportamiento mezcla completa. Sin embargo, las consideraciones del modelo planteado por Levenspiel no se cumplen, ya que la curva C (ver figura IV.3.) presenta fluctuaciones al azar, múltiples picos y asimetría, por lo que este parámetro debe ser descartado.

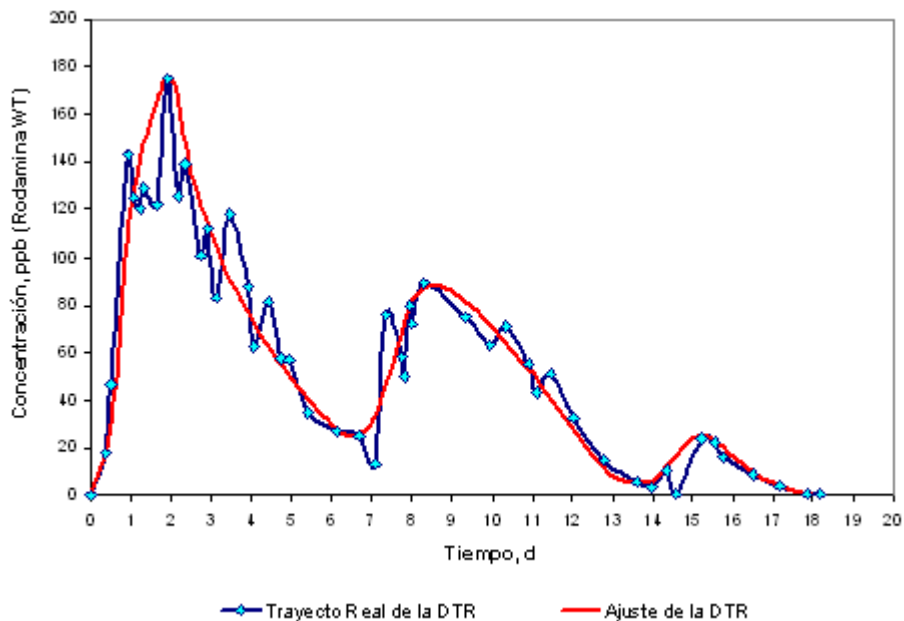


Figura IV.3. Curva C. Distribución de Tiempo de Residencia de la Laguna Facultativa de la P.E.T.A.-U.CV. Para una Carga Hidráulica de 2,0 MLD/ha.

El porcentaje de desviación del flujo pistón, 57% y la fracción considerada como flujo pistón 30%, no corresponde a estado estable del sistema, ya que la caracterización cualitativa de la concertación de trazador demostró que la laguna presenta dos condiciones hidráulicas que cumplen un ciclo de 24 horas, durante el día permanece estratificada, con una capa superficial, que no presenta mezclado vertical con los estratos medios e inferior; mientras que estos últimos presentan uniformidad y buen mezclado y de noche todo el volumen permanece mezclado.

La figura IV.3 representa el diagrama DTR de un flujo real, donde los máximos posiblemente están asociados a actividades microbiológicas en la laguna, que promueven el mezclado vertical. A continuación se presenta la tabla IV.5 donde se señalan las horas de incremento en el mezclado vertical que se relacionan con las siguientes actividades microbiológicas: el ascenso de las algas, su producción de oxígeno y la alta producción de gases por microorganismos anaerobios.

Tabla IV.5. Máximos característicos de la DTR para la carga hidráulica de 2,0 MLD/ha.

Fecha	Hora	Tiempo (d)	C (t) (ppb)	Característica
22/06/2006	12:00 p.m.	0,0	0	Inyección del Trazador
23/06/2006	11:00 a.m.	0,96	143	Ascenso de Algas
23/06/2006	08:09 p.m.	1,3	129	Producción de Gases
24/06/2006	10:39 a.m.	1,9	175	Ascenso de Algas
24/06/2006	08:37 p.m.	2,3	139	Producción de Gases
25/06/2006	09:55 a.m.	2,9	112	Ascenso de Algas
25/06/2006	11:39 p.m.	3,5	118	Producción de Gases
26/06/2006	10:19 p.m.	4,4	81	Producción de Gases
27/06/2006	10:57 a.m.	4,9	57	Ascenso de Algas
29/06/2006	08:34 p.m.	7,3	75	Producción de Gases
30/06/2006	11:18 a.m.	7,9	79	Ascenso de Algas
02/07/2006	08:30 p.m.	10,3	71	Producción de Gases
03/07/2006	11:40 p.m.	11,5	50	Producción de Gases
06/07/2006	09:28 p.m.	14,4	10	Producción de Gases
07/07/2006	05:46 p.m.	15,2	23	Descenso de Algas

*Carga Orgánica 231 Kg DBO/ha.d.

El mezclado nocturno en la laguna coincide con el inicio de la actividad microbiológica. Siendo la producción y ascenso de gases del metabolismo anaerobio, entre otros factores los posibles responsables del mezclado vertical en ausencia de estratificación. Durante el día, se presume que pueden llegar a contribuir con el aporte de material orgánico a la superficie.

La existencia de máximos de concentración después de transcurrido el mezclado homogéneo se atribuye a que parte del trazador fue fijado en los sólido que forman parte del lodo (ver apéndice G) y al resuspenderse debido a una perturbación, generan una mayor

concentración de trazador en el efluente. Esta característica fue apreciada durante el estudio ya que perturbaciones en el lodo resuspendían sólidos teñidos de trazador. Por lo que se filtraron muestras del estrato 100 cm a 1,2 μm y se demostró que el color aparente del trazador en el agua se debía a los sólidos.

IV.1.2.- Concentración de Fitoplancton

A continuación se presentan los resultados de concentración promedio de fitoplancton y su relación con los parámetros físico-químicos de interés.

Tabla IV.6. Promedios de clorofila "a" y parámetros físico-químicos a diferentes profundidades en la laguna facultativa. Carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d.

Hora	Profundidad (cm)	Clorofila "a" ($\mu\text{g/l}$)	O.D (mg/l)	pH	Alcalinidad en CaCO_3 (mg/l)	Conductividad (μS)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
8:00 a.m.	Afluente	0	0,4	7,9	288	751	26
	Efluente	244	1,8	8,0	232	578	25
	18	131	0,4	7,8	232	582	24
	54	110	0,4	7,7	237	581	25
	100	95	0,4	7,8	233	579	25
2:00 p.m.	Afluente	0	0,6	7,4	212	727	27
	Efluente	5	12,4	9,3	208	505	30
	18	344	15,0	8,7	203	560	28
	54	61	0,6	7,6	213	615	25
	100	44	0,6	7,7	220	607	25
8:00 p.m.	Afluente	0	0,6	7,4	228	650	27
	Efluente	63	7,8	9,0	240	504	26
	18	70	8,8	8,7	209	552	26
	54	61	0,4	7,6	240	583	25
	100	47	0,4	7,5	244	580	25
2:00 a.m.	Afluente	*	*	*	*	*	*
	Efluente	*	*	*	*	*	*
	18	*	0,4	7,5	239	570	25
	54	*	0,4	7,5	240	570	25
	100	*	0,4	7,7	240	571	25

* No existen resultados de dicho parámetro a esa hora.

** Visibilidad del disco secchi 18 cm.; radiación promedio 249 cal / cm^2 d; carga hidráulica 2,0 MLD/ha.

Fecha: 25/05/06.

Las concentraciones de clorofila “a” fueron adoptadas de Díaz y Rubio (2.006), quienes realizaron su investigación en paralelo con ésta, intercambiando resultados de ambos trabajos.

El fenómeno de la estratificación se observa en la tabla IV.6, al considerar los datos correspondientes a las 8:00 a.m., en el estrato superior (18 cm.) las algas están levemente concentradas y disminuye con la profundidad, lo que evidencia la migración del fitoplancton al estrato superior. El oxígeno disuelto demuestra condiciones anaerobias ($<0,5 \text{ mg/l}$ ^{Romero, 1.999}) homogéneas en todo el volumen de la laguna, por lo que para esta hora las algas no satisfacen la tasa de oxígeno demandado. Por otra parte, el pH es similar en el estrato medio e inferior y el estrato superior ligeramente mayor, lo que indica consumo de CO_2 en este nivel. Otras variables como alcalinidad, conductividad y temperatura no son afectadas de manera inmediata con el ascenso de las algas y sus actividades y permanecen homogéneas en la laguna.

Al observar las variables correspondientes a las 2:00 p.m., la concentración de algas en la superficie, $344 \mu\text{g/l}$, es mayor que la concentración de las capas inferiores, menos de $50 \mu\text{g/l}$, lo que demuestra una estratificación de las algas en la laguna. El oxígeno disuelto es mayor a 15 mg/l (rango máximo del oxímetro), mientras que los estratos medio e inferior no mostraron cambio significativo respecto a su condición anaerobia. Para los valores de pH, el estrato superior muestra una unidad de potencial de hidrógeno mayor respecto a los estratos inferiores, denotando mayor consumo de dióxido de carbono por la presencia de una mayor concentración de fitoplancton. Otra variable que indica estratificación es la temperatura, correspondiendo el valor más alto a la superficie, con una diferencia de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ respecto a los estratos medio e inferior. El nivel 54 cm. presentó alto valor de conductividad, $615 \mu\text{S}$, respecto a las otras profundidades, debido a que el flujo preferencial tiende a presentar características del afluente, $727 \mu\text{S}$, durante la estratificación.

Una vez que la radiación solar no está presente las algas se dirigen al fondo de la laguna ^{Mendonça, 2.000}, los datos de clorofila “a” para 8:00 p.m. muestran la migración. Para esta hora

el oxígeno disuelto en la zona superficial se ha reducido a 8 mg /l y la temperatura baja. El pH se reduce progresivamente debido a la inactividad de las algas. La alcalinidad de los estratos inferiores comienza a incrementar debido al predominio de carbonatos y bicarbonatos en ausencia de actividad fotosintética ^{Romero, 1.999}.

Para las 2:00 a.m., las variables del sistema son homogéneas en todo el volumen y el sistema opera en condiciones anaerobias.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para tres muestras instantáneas representativas del volumen del sistema, realizadas el día 25 de mayo de 2.006.

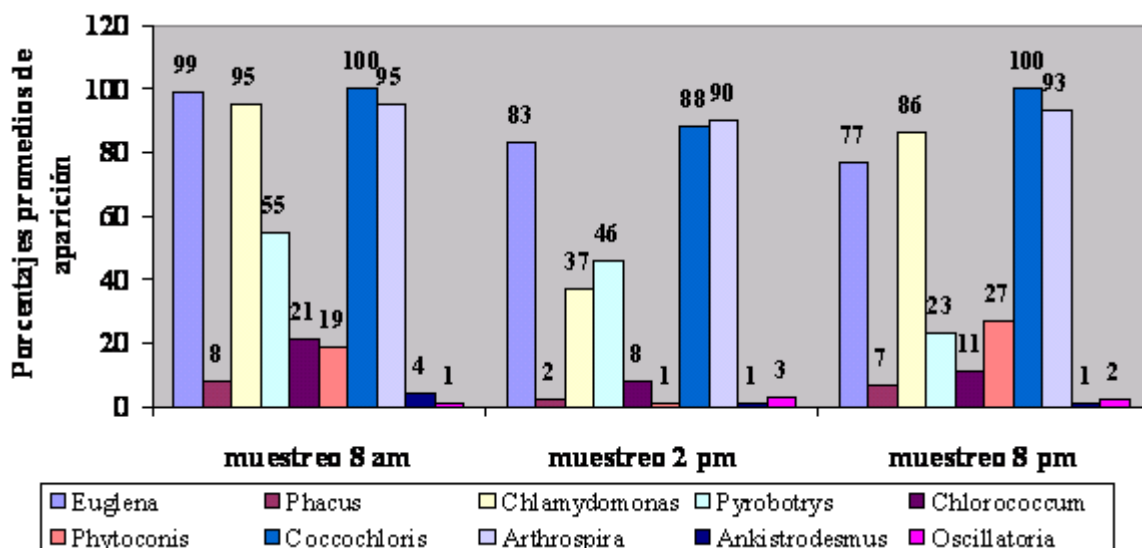


Figura IV.4. Porcentajes promedio de aparición de géneros de algas para una carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d en la laguna facultativa. Adoptada de Díaz y Rubio (2.006).

Los resultados de identificación de géneros de algas y su porcentaje promedio de aparición fueron adoptados de Díaz y Rubio (2.006).

El predominio de las elevadas concentraciones de clorofila “a” en la menor profundidad (18 cm.) durante el día y similares concentraciones durante la noche a diferentes alturas, tiene relación directa por la presencia de los géneros flagelados como *Euglena sp.*, *Pyrobotrys sp.* y *Chlamydomonas sp.*, que por su capacidad de locomoción en la columna líquida pueden migrar en respuesta a la luminosidad que las atrae hacia el lugar

Capítulo IV. Resultados y Análisis

donde absorben mejor la energía radiante del sol y en la noche migrar en sentido opuesto y permanecer libremente en toda la masa de agua. ^{Díaz y Rubio (2.006).}

El modelo teórico de König (1.984), que describe la estratificación de las algas, cobra valor ya que el autor adjudica el fenómeno a las algas flageladas y estas están presentes, por lo que se puede hacer una analogía con el modelo, resultando para la laguna a escala piloto ausencia de estratificación en el inicio de la mañana (7-9 horas) y su gradual desaparición al anochecer (18-20 horas), de acuerdo con los análisis de concentración de clorofila, oxígeno disuelto y pH, reportados en la tabla IV.6.

A continuación se presenta los resultados de remoción de nutrientes y su relación con la concentración de fitoplancton.

Tabla IV.7. Remoción de Nitrógeno y Ortofosfatos Solubles, para una carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d. Fecha 25 de mayo de 2.006.

Parámetro	Afluyente	Efluente Total	Remoción Total (%)	Efluente Soluble	Remoción Soluble (%)	Clorofila "a" 18 cm. 2:00p.m. ($\mu\text{g/l}$)
DBO _{5,20} (mg/l)	96	51	47	12	88	344
NTK (mg/l)	24,42	18,03	26	11,20	54	
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	17,14	9,41	45	-	-	
Fósforo Solubles (ortofosfato) (mg/l)	1,99	*	*	1,40	30	

* No se tienen resultados de fósforo total.

** Visibilidad del disco Secchi 18 cm; radiación promedio 249 cal / cm² d; carga hidráulica 2,0 MLD/ha. Fecha: 25/05/06.

La concentración de nutrientes en el afluyente se considera favorable para el desarrollo de algas lo cual ocurre en la laguna, concentración máxima de clorofila "a" 344 $\mu\text{g/l}$. Sin embargo, las microalgas presentes en la laguna que tienen movilidad,

contienen de 1.000 a 3.000 μg de clorofila por litro y de acuerdo con la calidad y tipo de nutrientes, los microorganismos crecen y los metabolizan a una tasa que depende de los factores ambientales ^{Romero, (1.999)}. Se considera que la concentración de algas en la laguna es baja y esto no se debe a la limitación de nutrientes en el afluente, DBO: 96 mg/l; NTK: 24 mg/l; ortofosfatos: 2 mg/l, ni a la radiación solar, 249 cal/cm².d, sino a factores como zona eufótica poco profunda (18 cm.), menor penetración de la luz; presencia de recirculaciones que generan condiciones de mezclado en el sistema y promueven la turbidez.

Aun y con estas condiciones desfavorables, el sistema es capaz de remover 47% (total) y 88 % (soluble) de DBO_{5,20}; 26% (total) y 54% (soluble) de nitrógeno total Kjeldahl (NTK); 45% de nitrógeno amoniacal; y 30% de ortofosfatos. Por lo que se considera un sistema con remoción de nutrientes.

IV.1.3.- Parámetros físico-químicos.

Los parámetros físico-químicos a lo largo de la laguna se mantienen semejantes para un tiempo en particular, es decir que los valores de una variable obtenidos de los puntos de la columna de líquido a la entrada del sistema, no difieren significativamente, a los correspondientes de la columna del medio y de la salida para una misma hora (ver apéndice E). Entonces se establece un promedio longitudinal de cada parámetro para su respectivo estrato en una hora en particular.

A continuación se muestran los parámetros físico-químicos promedio y su desviación estándar respecto a los tres muestreos realizados para la carga en estudio.

Tabla IV.8. Parámetros físico-químicos promedio a diferentes profundidades para los tres muestreos en la laguna facultativa. Carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d.

Hora	Profundidad (cm)	O.D (mg/l)	Desviación Estándar (±)	pH	Desviación Estándar (±)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)	Desviación Estándar (±)	Conductividad (μS)	Desviación Estándar (±)	Temperatura (°C)	Desviación Estándar (±)
8:00 a.m.	18	0,5	0,1	7,8	0,3	230	12	589	11	25	0
	54	0,5	0,1	7,7	0,2	232	10	587	10	25	0
	100	0,5	0,1	7,7	0,2	230	10	585	12	25	0
2:00 p.m.	18	15,0	0,0	9,0	0,3	207	9	545	9	29	1
	54	0,6	0,0	7,7	0,1	218	10	614	5	26	1
	100	0,6	0,1	7,5	0,2	219	7	611	6	25	1
8:00 p.m.	18	9,3	0,7	8,7	0,1	208	1	540	7	27	1
	54	0,4	0,0	7,5	0,3	231	8	593	3	26	1
	100	0,4	0,0	7,5	0,3	238	6	588	2	25	0
2:00 a.m.	18	0,4	0,0	7,5	0,1	230	14	582	3	24	1
	54	0,4	0,0	7,5	0,1	228	12	581	3	25	1
	100	0,4	0,1	7,5	0,1	228	10	581	2	25	1

*Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.

Capítulo IV. Resultados y Análisis

La tabla IV.8, muestra una baja desviación de las variables en cada muestreo, por lo que el promedio es representativo y el sistema se considera estable.

De los resultados se tiene que, después de las 8:00 p.m. y hasta las 8:00 a.m. la laguna opera de modo anaerobio debido a la inactividad fotosintética y durante el día opera facultativa después de las 8:00 a.m. hasta las 8:00 p.m., debido a la producción de oxígeno fotosintético. El pH muestra actividad algal a las 8:00 a.m. sin embargo no satisface la tasa demandada para esa hora; alcanza su máximo valor para el estrato superior cerca de las 2:00 p.m. coincidiendo con una alta producción de oxígeno disuelto, lo que implica mayor consumo de CO₂; a ésta hora la estratificación del sistema es más pronunciada, para las 8:00 p.m. el pH del estrato superior comienza a disminuir, como era de esperarse, debido al descenso de las algas. La conductividad muestra mayor valor en el estrato medio para las horas de estratificación, denotando así el flujo preferencial. Los valores de temperatura alcanzan su mayor gradiente a las 2:00 p.m.

Tabla IV.9. Comparación de la remoción de DBO considerando el tiempo de retención y sin considerarlo. Carga orgánica 231 Kg DBO/ha.d.

	DBO Afluyente (mg/l)	DBO Efluyente (mg/)	Remoción (%)
DBO promedio sin considerar tiempo de retención	111	53 (total)	52 (total)
		14 (soluble)	87 (soluble)
Del 25/05/06 al 01/06/06	96	55 (total)	43 (total)
		14 (soluble)	85 (soluble)
Del 01/06/06 al 08/06/06	108	56 (total)	48 (total)
		15 (soluble)	86 (soluble)
Del 08/06/06 al 15/06/06	135	50 (total)	63 (total)
		16 (soluble)	88 (soluble)

*Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.

En el análisis de los parámetros físico-químicos, se demostró que el sistema responde de forma similar en el tiempo. Los resultados de DBO_{5,20} son consistentes con lo anterior, al comparar los porcentaje de remoción considerando el tiempo de retención estos son similares entre ellos y también al porcentaje promedio donde no se consideró el tiempo

Capítulo IV. Resultados y Análisis

de retención. Entonces, la laguna tuvo capacidad de amortiguar las diferentes condiciones hidráulicas y meteorológicas a la que fue sometida, manteniéndose estable.

A continuación se presentan un resumen de los parámetros físico-químicos promedio correspondientes a los cuatro muestreos compuestos de 24 horas tomados a la entrada y salida del sistema.

Tabla IV.10. Análisis físico-químicos para la carga orgánica de 231 Kg DBO/ha.d.

Análisis	Afluente	Efluente	Remoción %
DBO _{5.20} mg/l	112	53	53
DBO _{5.20} Soluble mg/l	*	14	88
DQO Total mg/l	188	155	18
DQO Soluble mg/l	*	48	75
Nitrógeno total Kjeldahl mg/l -N	23,1	17,9	23
Nitrógeno total Kjeldahl soluble mg/l -N	*	12,0	48
Nitrógeno orgánico total mg/l -N	6,38	7,76	NA
Nitrógeno orgánico soluble mg/l -N	*	1,82	71
Nitrógeno amoniacal mg/l -N	16,72	10,14	39
Fósforo solubles (Ortofosfatos) mg P/l	2,05	1,58	23
Sólidos totales mg/l	391	374	NA
Sólidos totales fijos mg/l	338	322	NA
Sólidos totales volátiles mg/l	262	252	NA
Sólidos totales disueltos mg/l	242	231	NA
Sólidos disueltos fijos mg/l	129	122	NA
Sólidos disueltos volátiles mg/l	96	90	NA
Sólidos suspendidos totales mg/l	53	52	NA
Sólidos suspendidos fijos mg/l	20	21	NA
Sólidos suspendidos volátiles mg/l	43	31	NA
Sólidos sedimentables ml/l	0,5	0,2	NA

* Se consideró el afluente total.

**Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.

NA: no aplica

IV.1.4.- Balance Hídrico

El balance considerando el tiempo de retención del sistema.

Tabla IV.11. Comparación del Balance hídrico con la remoción de DBO, considerando el tiempo de retención del sistema para la Carga orgánica 231 Kg DBO/ha.d.

Fecha de Análisis	Caudal Afluyente (l/min)	Precipitación Promedio (l/min)	Evaporación Promedio (l/min)	Caudal Efluyente (l/min)	Pérdida de Caudal Afluyente (%)	Afluyente DBO mg/l	Remoción DBO Total (%)
Del 25/05/06 al 01/06/06	10,0	0,01	0,23	9,8	2,2	96	43
Del 01/06/06 al 08/06/06	10,0	0,17	0,24	9,9	0,8	108	48
Del 08/06/06 al 15/06/06	10,0	0,05	0,27	9,8	2,2	135	63

*Tiempo de retención teórico 6,5 días, tiempo de retención medio 5,4 días.

**Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.

Para las fechas de estudio predomina la pérdida por evaporación con un valor promedio de 5,3 mm por día, lo que representa una pérdida aproximada de 2% del caudal afluyente durante el tiempo de retención. La precipitación promedio diaria fue de 1,5 mm por día. Entonces, las pérdidas y aportes por evaporación y precipitación, respectivamente, son despreciables comparadas con el caudal afluyente.

Las variables hídricas no presentan cambios bruscos, por lo que las variaciones del porcentaje de remoción están más asociadas al incremento de la DBO del afluyente en el tiempo, que a los factores evaporación y/o precipitación.

IV.1.5.- Parámetros Meteorológicos.

La radiación solar es el factor de mayor influencia en el sistema, es el responsable de la actividad fotosintética de las algas y por esto está asociado al oxígeno disuelto, en su ausencia el sistema opera en condiciones anaerobias. A continuación se presenta esta relación:

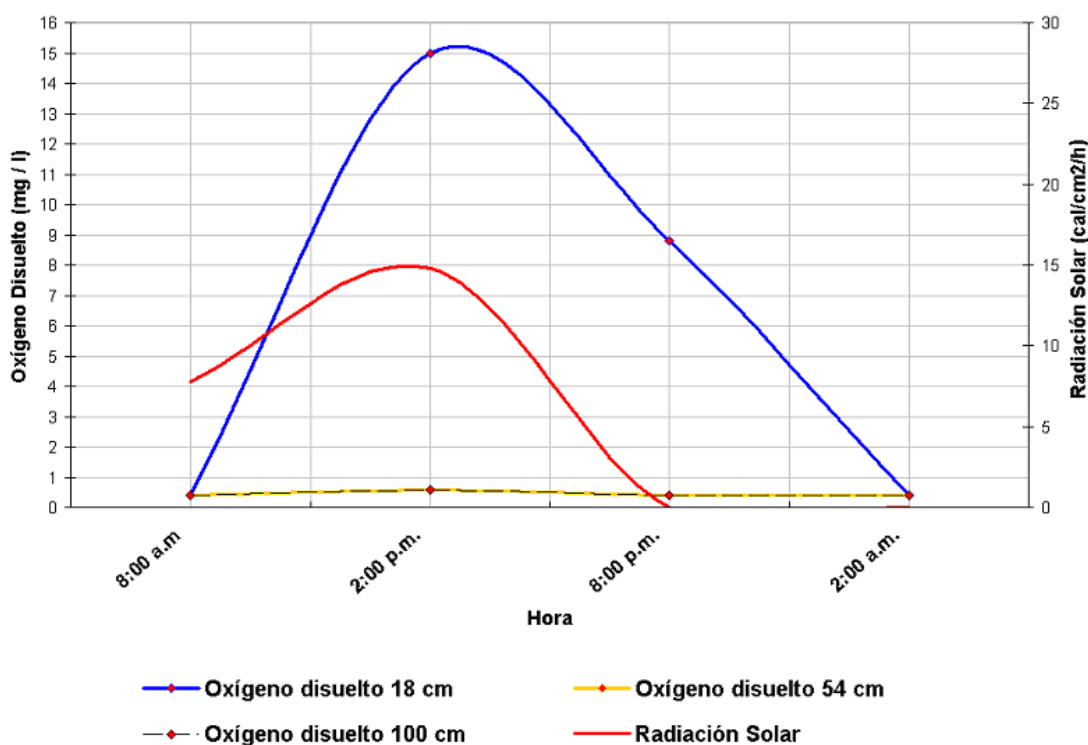


Figura IV.5. Influencia de radiación solar en la variación horaria de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Carga Orgánica 231 Kg DBO/ha.d. Fecha: 25/05/06.

La figura IV.5 muestra la influencia que tiene la radiación solar en la concentración de O.D. en la zona eufótica y las condiciones anaerobias en los estratos inferiores. Esta variable meteorológica permite buen aporte de energía en el estrato superior y éste es aprovechado por las algas para producir oxígeno, profundidades iguales o mayores a los 54 cm no reciben buen aporte de energía solar y el oxígeno producido no compensa la tasa demandada.

La dirección predominante del viento es noreste-suroeste coincidiendo con la dirección entrada salida del sistema. La velocidad promedio es de 2,9 Km./h. el análisis cualitativo de trazador no mostró evidencia de mezclado o cortocircuito debido al viento, las condiciones anaerobias del sistema durante la noche demuestra que el aporte de oxígeno por reaeración es despreciable. Sin embargo, se observó que la velocidad y dirección del viento contribuyen con la acumulación de algas muertas (material flotante) a la salida y su posterior incorporación al efluente.

IV.2.- Segunda Carga Hidráulica 4,5 MLD/ha.

IV.2.1.- Análisis Hidráulico.

La interpretación de los resultados se realizó de la misma forma que para la carga hidráulica 2,0MLD/ha.

Ensayo N° 1 para un tiempo de 30 minutos después de la inyección del trazador:

Tabla IV.12. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min., después de la inyección del trazador.

	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
Profundidad (cm)	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	322	78	117	93	96	114
54	850	782	650	607	878	737
100	>1000	>1000	730	>1000	129	347

* Hora de inyección 12:00 p.m.

*Visibilidad del disco Secchi 15 cm, penetración de la luz constante; radiación promedio 373 cal / cm² d.

*Carga Orgánica 306 Kg DBO/ha.d.

La segunda carga hidráulica muestra nuevamente el flujo preferencial para la profundidad de 54 cm., con alta acumulación de trazador a la salida de la laguna. Esto también se debe a alta velocidad del afluente, 855 m/h, que es $2,7 \cdot 10^3$ veces más rápida

que la velocidad de la masa de agua en la laguna (ver apéndice C), valor que confirma la recirculación en el estrato y presencia de cortocircuito.

Un aumento en la velocidad del afluente, comparado con la primera carga hidráulica, produce mayor turbulencia, permitiendo mayor aporte de materia hacia la superficie, como se puede observar en la columna “A”. Por lo que para esta carga hidráulica, se tiene mayor cantidad de sólidos suspendidos, 61 mg/l, en comparación con la primera, 44 mg/l. Sin embargo, el estrato superior muestra baja mezcla vertical con el nivel medio, debido a la presencia de estratificación diurna.

El estrato inferior presenta zonas muertas a pesar del aumento del mezclado.

Ensayo N° 2 para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador:

Tabla IV.13. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador.

Profundidad (cm.)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	705	689	702	734	714	738
54	709	707	706	727	692	716
100	757	720	733	740	727	726

Nuevamente se observa mezclado perfecto en todo el volumen de la laguna después de las 6:00 p.m., por lo que hay correspondencia con el análisis anterior, entonces, en la zona eufótica el comportamiento hidráulico es transitorio.

A continuación se presenta el estudio hidráulico cuantitativo para la segunda carga hidráulica.

Al igual que para la carga anterior, los parámetros de la curvas C y F son descartados a excepción del tiempo de retención medio, debido a que la hidráulica no es estable. Durante el día la laguna permanece estratificada y por la noche mezclada. Sin embargo, son presentados a continuación.

Tabla IV.14. Parámetros Hidráulicos. Carga hidráulica 4,5 MLD/ha.

Parámetros Asociados a la Curva C		
Tiempo de retención teórico, (d)	t_0	3,1
Tiempo de retención real, (d)	t	2,0
Tiempo de retención medio t/t_0 , (adimensional)	θ_c	0,67
Desviación del Flujo Pistón, (%)	θ_{pf}	51
Volumen muerto, (%)	V_m	34
Volumen efectivo, (%)	V_e	66
Dispersión, (adimensional)	d	0,67
Parámetros Asociados a la Curva F		
Fracción considerada flujo pistón, (%)	p	33
Fracción considerada mezcla completa, (%)	FMC	67
Fracción considerada como volumen muerto, (%)	V_m	38
Fracción considerada como volumen efectivo, (%)	V_e	62

*Carga Orgánica 306 Kg DBO/ha.d.

El valor del tiempo de retención medio adimensional $\theta_c = 0,67$, indica la existencia de cortocircuito y volumen estancado, lo cual fue identificado en el análisis cualitativo.

El volumen muerto de la laguna es alto y al igual que el análisis realizado anteriormente, no corresponde a zonas estancadas del sistema. La caracterización cualitativa mostró que la capa de lodo en el fondo de la laguna presenta las zonas estancadas durante la estratificación del sistema y en comparación con la primera carga, esta es perturbada con mayor intensidad debido al aumento de la velocidad del afluente.

El sistema no cumple las consideraciones del modelo planteado por Levenspiel, ya que la curva C (ver figura IV.6.) presenta fluctuaciones al azar y múltiples picos. Por lo que este parámetro dispersión debe ser descartado.

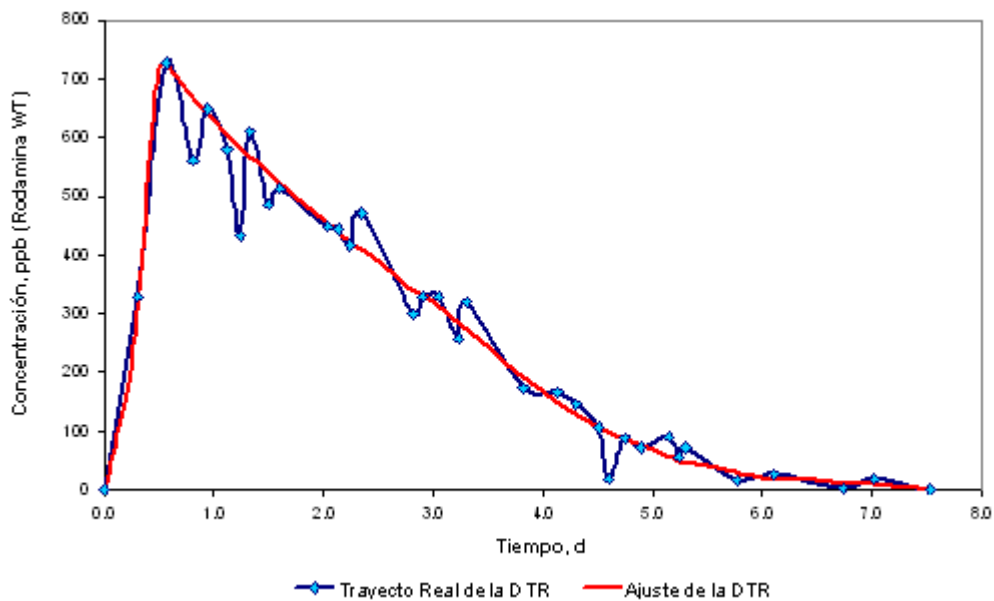


Figura IV.6. Curva C. Distribución de Tiempo de Residencia de la Laguna Facultativa de la P.E.T.A.-U.CV. Para una Carga Hidráulica de 4,5 MLD/ha.

Los máximos de la figura IV.6 pudieran estar asociados a actividades microbiológicas en la laguna, pudiendo favorecer así el mezclado vertical y la transferencia de masa entre los estratos. A continuación se presenta en la planta IV.15 estos puntos.

Tabla IV.15. Máximos característicos de la DTR para la carga hidráulica de 4,5 MLD/ha.

Fecha	Hora	Día	C (t) (ppb)	Característica
22/06/2006	12:45 p.m.	0	0	Inyección del Trazador
29/07/2006	01:41 a.m.	0,6	729	Producción de Gases
29/07/2006	10:25 a.m.	0,9	649	Ascenso de Algas
29/07/2006	07:51 p.m.	1,3	610	Producción de Gases
30/07/2006	08:23 p.m.	2,4	471	Producción de Gases
31/07/2006	09:39 a.m.	2,9	330	Ascenso de Algas
31/07/2006	07:13 p.m.	3,3	320	Producción de Gases
01/08/2006	07:03 p.m.	4,3	146	Producción de Gases
02/08/2006	05:57 a.m.	4,7	87	Producción de Gases
02/08/2006	03:30 p.m.	5,1	91	Producción de Oxígeno
02/08/2006	07:13 p.m.	5,3	72	Producción de Gases
03/08/2006	02:34 p.m.	6,1	28	Producción de Oxígeno
04/08/2006	12:24 p.m.	7,0	19	Producción de Oxígeno

*Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.

La situación es similar a la primera carga, el mezclado nocturno en la laguna se debe posiblemente a la producción y ascenso de gases del metabolismo anaerobio y durante el día, podrían contribuir con el aporte de material orgánico a la superficie. Así mismo, se aprecia la posible perturbación generada por la saturación de oxígeno.

Aunque la curva C presentada en la figura IV.6 se ajusta al comportamiento flujo mezcla completa, ésta no considera la trayectoria de la partículas del flujo o de cómo éste se distribuye en el reactor, solo indica su permanencia ^(CEPIS/OPS 2005), por lo que se debe interpretar como flujo transitorio.

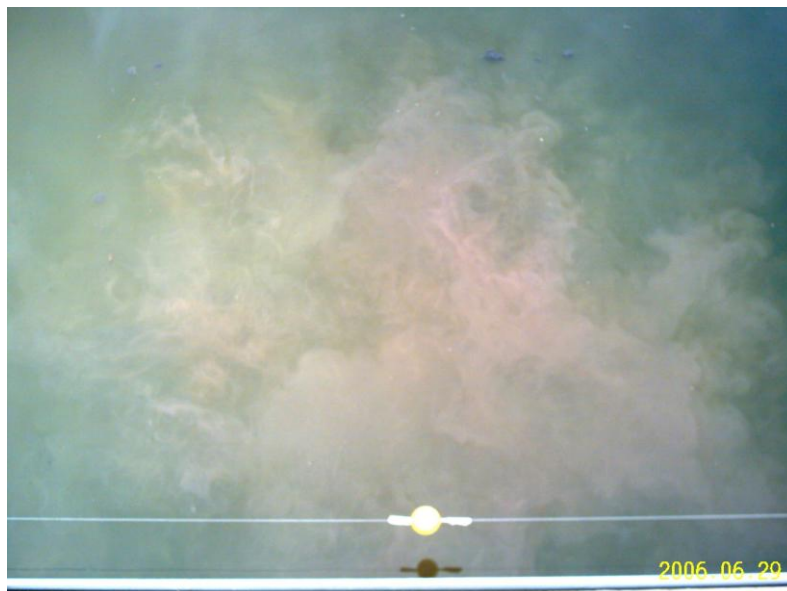


Figura IV.7. Resuspensión de sólidos, teñidos de rodamina WT, debido a una perturbación aplicada en la columna de agua.

Como se mencionó anteriormente una perturbación en la columna de líquido resuspende los sólidos teñidos de trazador que se encuentran en la capa de lodo, en esta oportunidad la perturbación fue provocada con la introducción brusca y una leve agitación de una barra metálica hasta lo profundo de la laguna.

IV.2.2.- Concentración de Fitoplancton

En esta sección se presenta los resultados de concentración promedio de fitoplancton y su relación con los parámetros físico-químicos. Las concentraciones de clorofila “a” fueron adoptadas de Díaz y Rubio (2.006).

Tabla IV.16 Promedios de clorofila “a” y parámetros físico-químicos a diferentes profundidades en la laguna facultativa. Carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d.

Hora	Profundidad (cm)	Clorofila "a" (µg/l)	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Temperatura (°C)
8:00 a.m.	Afluente	*	0,8	727	28
	Efluente	*	2,7	575	28
	15	32	0,4	556	28
	45	10	0,4	561	27
	100	35	0,4	560	27
2:00 p.m.	Afluente	*	1,8	653	28
	Efluente	*	15	511	31
	15	134	14,4	531	28
	45	39	0,5	580	26
	100	21	0,5	573	26
8:00 p.m.	Afluente	*	1,1	614	26
	Efluente	*	3,7	536	27
	15	16	0,6	548	27
	45	19	0,4	560	27
	100	35	0,4	570	26
2:00 a.m.	Afluente	*	2,2	465	25
	Efluente	*	0,5	544	25
	15	*	0,4	570	25
	45	*	0,4	570	25
	100	*	0,4	571	25

* No existen resultados de dicho parámetro a esa hora.

** Los resultados de pH y alcalinidad no fueron registrados debido a problemas técnicos.

*** Visibilidad del disco Secchi 15 cm; radiación promedio 394 cal / cm² d; carga hidráulica 4,5 MLD/ha.

Fecha: 15/08/06.

La reducción de biomasa algal es más del 50%, 134 µg clorofila a /l, respecto a la primera carga, 344 µg clorofila a /l. Lo cual está asociado a un aumento de la carga

orgánica, la reducción de la zona eufótica y menor tiempo de retención para la reproducción.

En la tabla IV.16 se puede apreciar el ascenso de las algas a las 8:00 a.m. La actividad fotosintética para éste momento no compensa la tasa de oxígeno demandada por el sistema, por lo que el oxígeno disuelto demuestra condiciones anaerobias en todo el volumen de la laguna, La conductividad también es homogénea y la temperatura superficial aumentó 1 °C debido a la radiación solar.

A las 2:00 p.m., la concentración de algas en la superficie es de 134 µg/l, mayor que la concentración de las capas inferiores, menos de 39 µg/l, lo que demuestra estratificación de las algas. El oxígeno disuelto es 14,4 mg O₂ /l, mientras que los estratos medio e inferior operan en condiciones anaerobia. Para esta hora la temperatura superficial, marca una diferencia de 2 °C respecto a los estratos medio e inferior. El nivel 45 cm presentó alto valor de conductividad, 580 µS, respecto a las otras profundidades, debido a que el flujo preferencial tiende a presentar características del afluente, 653 µS, durante la estratificación.

Para las 8:00 p.m. la concentración de clorofila “a” muestran la migración de las algas. Para esta hora la laguna opera en condiciones anaerobias. Otras variables se muestran homogéneas. Estas condiciones se mantienen iguales para las 2:00 a.m., a diferencia de la temperatura que presenta su menor valor.

A continuación la figura IV.8 presenta los resultados obtenidos para tres muestras instantáneas representativas del volumen del sistema, realizadas el día 15 de agosto de 2.006.

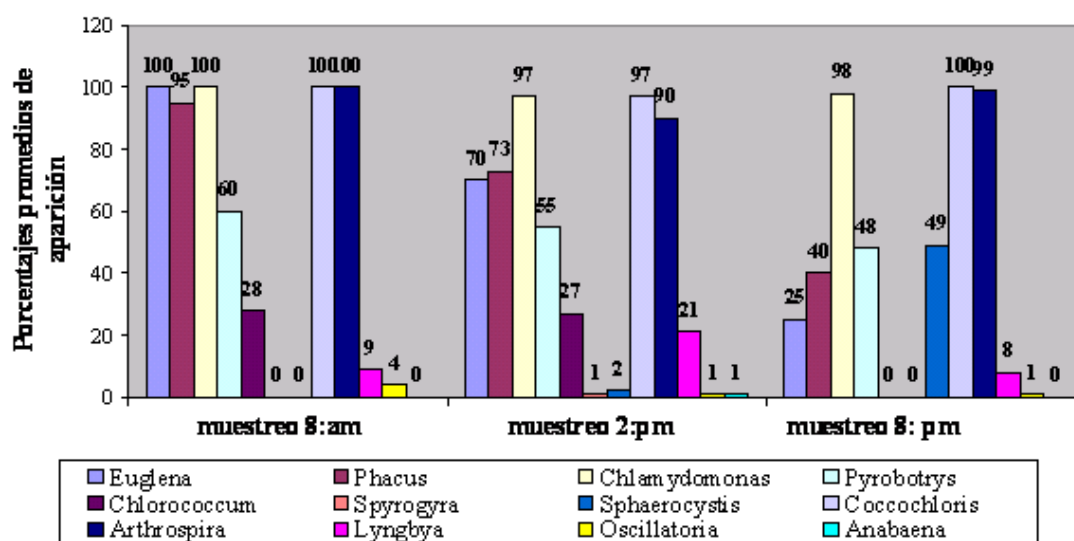


Figura IV.8. Porcentajes promedio de aparición de géneros de algas para una carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d en la laguna facultativa. Adoptada de Díaz y Rubio (2.0006).

Los resultados de identificación de géneros de algas y su porcentaje de aparición fueron adoptados de Díaz y Rubio (2.006).

Entre los grupos de algas encontrados durante el día para los tres muestreos (8:00 a.m., 2:00 p.m. y 8:00 p.m.) se observaron las Euglenofitas Cianofitas y Clorofitas (ver figura IV.8). Las Euglenofitas fue el grupo más frecuente en todos los estratos y a diferentes horas en todo el sistema representado por los géneros *Euglena* y *Phacus*. También para este grupo se identificó con una ubicación estratificada de la especie *Chlorococcum* y *Spyrogyra*, pero en menor grado, en comparación con las demás especies. En el grupo de las Cianofitas o Cianobacterias los géneros frecuentes fueron *Arthrospira* y *Coccochloris* y los menos frecuentes *Lyngbya* y *Oscillatoria* situados en la estación del medio y en los extremos del vertedero de salida respectivamente. ^{Díaz y Rubio, (2.006)}

Para esta carga también se presentan los géneros flagelados por lo que el modelo de König (1.984), explica el fenómeno de la estratificación de biomasa algal.

En la tabla IV.17, se presentan los resultados de remoción de nutrientes y su relación con la concentración de fitoplancton.

Tabla IV.17. Remoción de Nitrógeno y Ortofosfatos Solubles, para una carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d. Fecha 15 de agosto de 2.006.

Parámetro	Afluyente	Efluente (Total)	Remoción Total (%)	Efluente (Soluble)	Remoción soluble (%)	Clorofila "a" 15 cm. 2:00 p.m. (µg/l)
DBO _{5,20} (mg/l)	68,0	46,0	46	14,3	78	134
NTK (mg/l)	19,70	18,04	7	11,2	43	
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	14,11	9,97	29	-	-	
Nitratos (mg/l)	0,632	-	-	0,461	27	
Nitritos (mg/l)	0,040	-	-	0,036	10	
Fósforo Solubles (ortofosfato) (mg/l)	2,82	*	*	1,86	34	

* No se tienen resultados de fósforo total.

** Visibilidad del disco Secchi 15 cm; radiación promedio 394 cal / cm² d; carga hidráulica 4,5 MLD/ha. Fecha: 15/08/06.

La concentración superficial de algas en la laguna, 134 µg/l, es baja, menor a 1.000 µg/l ^{Romero, (1.999)} y esto no se debe a la limitación de nutrientes en el afluyente, DBO: 68 mg/l; NTK: 20 mg/l; ortofosfatos: 3 mg/l; ni a la radiación solar, 394 cal/cm².d, sino, como se mencionó en la discusión de la primera carga, a factores que generan condiciones de mezclado y promueven la turbidez. Otro factor a considerar es el tiempo de retención real de 2,0 días, ya para un tiempo de retención próximos o menores a 1,6 días, es cercano al tiempo de reproducción de las algas, las cuales pueden ser eliminadas con el efluente, sin haber tenido tiempo suficiente para que ocurra su multiplicación ^(Mendonça, 2.000).

Sin embargo, aun y con una reducción de más del 50% de biomasa algal, 134 μg clorofila *a* /l, respecto a la primera carga, 344 μg clorofila *a* /l, el sistema es capaz de remover 46% (total) y 78 % (soluble) de $\text{DBO}_{5,20}$; 7% (total) y 43% (soluble) de nitrógeno total Kjeldahl (NTK); y 34% de ortofosfatos. Por lo que el sistema presenta remoción de nutrientes.

IV.2.3.- Parámetros físico-químicos.

Al igual que para la primera carga hidráulica, los parámetros físico-químicos a lo largo de la laguna se mantienen semejantes para un tiempo en particular, ver apéndice E.

Las desviaciones respecto a los diferentes muestreos para la carga en estudio son bajas, los promedios son representativos y el sistema presenta estabilidad físico-química, a pesar de las fluctuaciones de los parámetros de influencia.

Las variables de la tabla IV.18 muestra la misma tendencia que para los resultados de la primera carga hidráulica. A las 8:00 a.m. el volumen es anaerobio, luego el sistema se estratifica como lo muestra el perfil correspondiente a las 2:00 p.m. a esta hora el pH alcanza su máximo valor para el estrato superior, coincidiendo con alta producción de oxígeno disuelto, 15 mg/l, lo que implica mayor consumo de CO_2 . A las 8:00 p.m. el O.D. del estrato superior se ha consumido en su mayoría. Finalmente a las 2:00 a.m. las condiciones son anaerobias.

Tabla IV.18. Parámetros físico-químicos promedios a diferentes profundidades para los tres muestreos en la laguna facultativa. Carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d.

Hora	Profundidad (cm)	O.D (mg/l)	Desviación Estándar (±)	pH	Desviación Estándar (±)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)	Desviación Estándar (±)	Conductividad (µS)	Desviación Estándar (±)	Temperatura (°C)	Desviación Estándar (±)
8:00 a.m.	18	0,9	0,2	7,7	0,4	141	0	557	12	26	1
	54	0,6	0,2	7,7	0,4	142	5	556	11	26	1
	100	0,6	0,1	7,7	0,4	142	2	557	12	26	1
2:00 p.m.	18	14,8	0,3	8,9	0,1	140	17	519	10	29	1
	54	1,2	0,9	7,8	0,4	141	14	579	7	27	1
	100	0,5	0,1	7,7	0,4	145	17	576	5	27	1
8:00 p.m.	18	0,9	0,6	7,7	0,3	135	2	542	13	27	2
	54	0,5	0,1	7,6	0,1	138	6	553	22	26	1
	100	0,5	0,1	7,5	0,0	138	11	555	25	26	1
2:00 a.m.	18	0,5	0,2	7,4	0,2	137	6	544	14	26	1
	54	0,5	0,1	7,4	0,2	138	6	544	14	26	1
	100	0,4	0,1	7,3	0,1	137	9	543	15	26	1

* Carga hidráulica 4,5 MLD/ha.

Capítulo IV. Resultados y Análisis

Los resultados del porcentajes de remoción de DBO_{5,20} son consistentes con lo anterior. Al comparar entre si los resultados considerando el tiempo de retención estos son similares al igual que con el valor promedio donde no se consideró el tiempo de retención. A excepción del porcentaje de remoción del último ensayo que presenta un 2%, donde el factor de influencia es la precipitación que genera dilución del afluente 48 mg/l, esto se discute en el balance hídrico.

Tabla IV.19. Comparación de la remoción de DBO considerando el tiempo de retención y sin considerarlo. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.

	DBO Afluente (mg/l)	DBO Efluente (mg/)	Remoción (%)
DBO promedio sin considerar tiempo de retención	68	46 (total)	46 (total)
		14 (soluble)	78 (soluble)
Del 08/08/06 al 15/08/06	87	47 (total)	46 (total)
		14 (soluble)	84 (soluble)
Del 15/08/06 al 17/08/06	60	42 (total)	30 (total)
		14 (soluble)	77 (soluble)
Del 17/08/06 al 19/08/06	48	47 (total)	2 (total)
		14 (soluble)	70 (soluble)

* Carga hidráulica 4,5 MLD/ha

Capítulo IV. Resultados y Análisis

A continuación se presentan un resumen de los parámetros físico-químicos promedio correspondientes a los cuatro muestreos compuestos de 24 horas tomados a la entrada y salida del sistema.

Tabla IV.20. Resultados de los análisis físico-químicos para la carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d.

Análisis	Afluente	Efluente	Remoción %
DBO _{5,20} mg/l	68	46	32
DBO _{5,20} Soluble mg/l	*	15	78
DQO Total mg/l	166	133	20
DQO Soluble mg/l	*	47	72
Nitrógeno total Kjeldahl mg/l -N	17,71	16,21	8
Nitrógeno total Kjeldahl soluble mg/l -N	*	11,06	37
Nitrógeno orgánico total mg/l -N	4,95	6,41	NA
Nitrógeno orgánico soluble mg/l -N	*	1,26	74
Nitrógeno amoniacal mg/l -N	12,76	9,8	23
Nitratos mg/l -N	0,63	0,51	19
Nitritos mg/l -N	0,035	0,029	17
Fósforo solubles (Ortofosfatos) mg P/l	2,45	1,9	22
Sólidos totales mg/l	368	375	NA
Sólidos totales fijos mg/l	291	314	NA
Sólidos totales volátiles mg/l	245	236	NA
Sólidos totales disueltos mg/l	220	214	NA
Sólidos disueltos fijos mg/l	123	139	NA
Sólidos disueltos volátiles mg/l	71	100	NA
Sólidos suspendidos totales mg/l	77	61	NA
Sólidos suspendidos fijos mg/l	25	22	NA
Sólidos suspendidos volátiles mg/l	52	39	NA
Sólidos sedimentables mg/l	0,6	0	NA

* Se consideró el afluente total.

**carga hidráulica 4,5 MLD/ha.

NA: no aplica

IV.2.4.- Balance Hídrico

El balance se realizó considerando el tiempo de retención del sistema, lo que permitió determinar la variación del caudal afluente a consecuencia de la evaporación y precipitación. A continuación, se presentan los resultados del balance hídrico y la relación con la remoción de DBO_{5,20}.

Tabla IV.21. Comparación del Balance hídrico con la remoción de DBO, considerando el tiempo de retención del sistema para la carga hidráulica de 4,5 MLD/ha.

Fecha de Análisis	Caudal Afluente (l/min)	Precipitación Promedio (l/min)	Evaporación Promedio (l/min)	Caudal Efluente (l/min)	Pérdida de Caudal Afluente (%)	Afluente DBO mg/l	Remoción DBO Total (%)
Del 08/08/06 al 15/08/06 ^a	22,0	0,14	0,23	21,9	0,4	87	46
Del 15/08/06 al 17/08/06	22,0	0,30	0,19	22,1	-0,5 ^b	60	30
Del 17/08/06 al 19/08/06	22,0	0,34	0,05	22,3	-1,3 ^b	48	2
19/08/06 ^c	-	-	-	-	-	77	64

* Tiempo de retención teórico 3,1 días, tiempo de retención medio 2,0 días. Carga orgánica de 306 Kg DBO/ha.d.

^a Debido a fuertes precipitaciones el muestreo correspondiente a los 2 días fue suspendido y se realizó 7 días después.

^b El signo negativo implica que es un aporte de agua por precipitación.

^c Muestra compuesta que no considera el tiempo de retención.

Para las fechas de estudio predominó el aporte por precipitación con un promedio diario de 5,3 mm por día, lo que representa un aporte aproximado de 0,5 % del caudal

afluente durante el tiempo de retención. La pérdida por evaporación promedio fue de 3,2 mm por día. Entonces, las pérdidas y aportes por evaporación y precipitación, respectivamente, son despreciables comparadas con el caudal afluente.

La remoción de la DBO total, considerando el tiempo de retención, es mínima para el último ensayo, del 17 al 19 de agosto, correspondiendo al mayor aporte por precipitación, 1,3 % del caudal afluente. Esto se debe a que el afluente del día 17, presentó dilución 48 mg DBO/l, sin embargo, la dilución del afluente no se mantuvo en el tiempo, DBO día 19 77 mg/l. Entonces la precipitación alteró los resultados del estudio entrada-salida del sistema, pero no a la estabilidad del sistema, como se demostró en el estudio físico-químico a lo largo y profundo del sistema.

Para este estudio se observa que la DBO del afluente, fluctúa en el tiempo y esto se debe a las precipitaciones.

IV.2.5.- Parámetros Meteorológicos.

A continuación se presenta la influencia de la radiación solar en variación horario del oxígeno disuelto. Como se mencionó anteriormente la radiación es la responsables, de la fotosíntesis de las algas y por esto está asociado al oxígeno disuelto, en su ausencia el sistema opera en condiciones anaerobias.

En la figura IV.9., el estrato superior está definido por la penetración de la luz visible y corresponde a la zona eufótica, 15 cm de profundidad medido con el disco secchi, donde se presenta la mayor concentración de O.D., 14,9 mg/l. La hora para la cual se obtiene un máximo de O.D. es aproximadamente a las 4:00 p.m. la cual no coincide con el máximo de radiación solar (12:00 p.m.) puesto que las algas solo aprovechan un porcentaje de la radiación y altas intensidades de energía generan condiciones adversas, entonces la mayor actividad fotosintética está sujeta a esta condición. Para la condición local del día (285 cal/cm².d) se aprecia que las algas presentan mayor actividad fotosintética después de transcurrido el máximo valor de radiación.

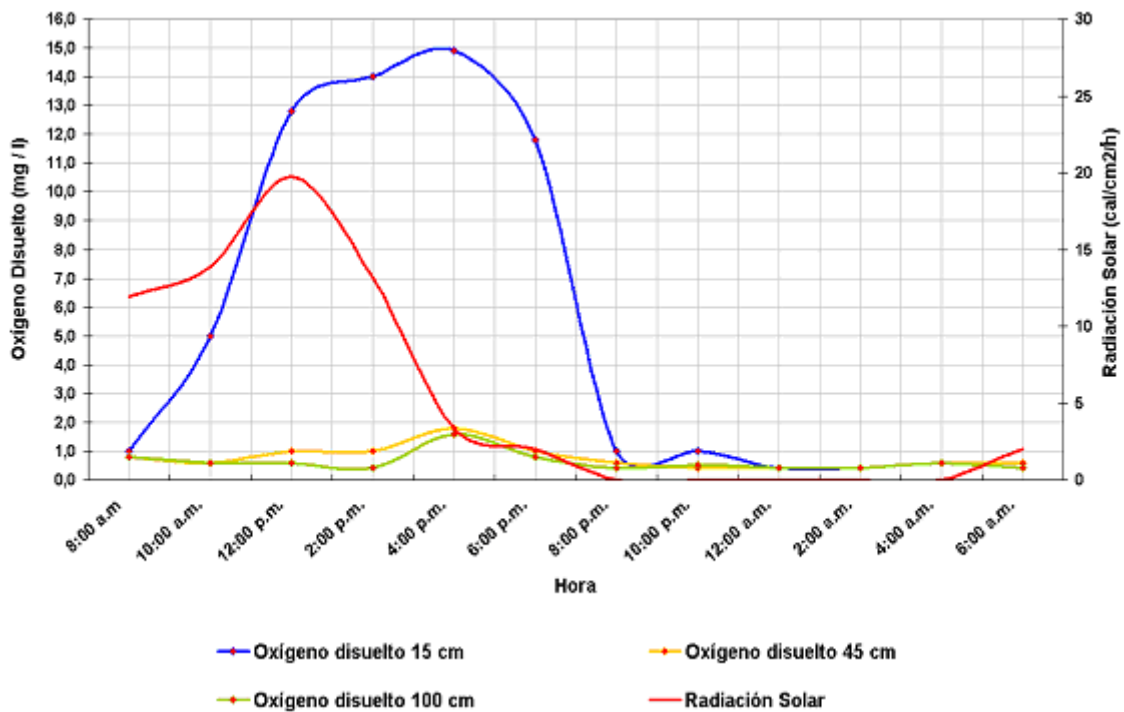


Figura IV.9. Influencia de radiación solar en la variación horaria de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Carga Orgánica 306 KgDBO/ha.d. Fecha: 19/08/06.

Una vez que la radiación comienza a disminuir el O.D. tiende a un mínimo, 0,4 mg/l, para los tres estratos y permanece constante hasta que la radiación incide nuevamente, esta es una evidencia del aporte exclusivo de oxígeno por parte de las algas al sistema. El rango de tiempo que permanece la laguna en condiciones anaerobias, está entre las 8:00 p.m. y las 8:00 a.m.

Durante el día, los estratos inferiores presentan concentraciones de oxígeno disuelto bajas menores a 2 mg/l. valor que corresponde al tiempo de máxima actividad fotosintética, por lo que operan en condiciones facultativas para algunas horas del día.

La variación horaria del oxígeno, de 8:00 a.m. a 8:00 p.m., es un buen aproximado del tiempo de estratificación del sistema, mientras que la profundidad del disco secchi, 15 cm, es una buena aproximación de la estratificación superior. El hecho de que coincida la

estratificación del sistema con la zona eufótica, se debe a la turbidez generada por la alta velocidad del afluente y las recirculaciones.

Otra variable que presenta variación horaria debido a la radiación es la temperatura, a continuación se muestra el comportamiento de dicho parámetro.

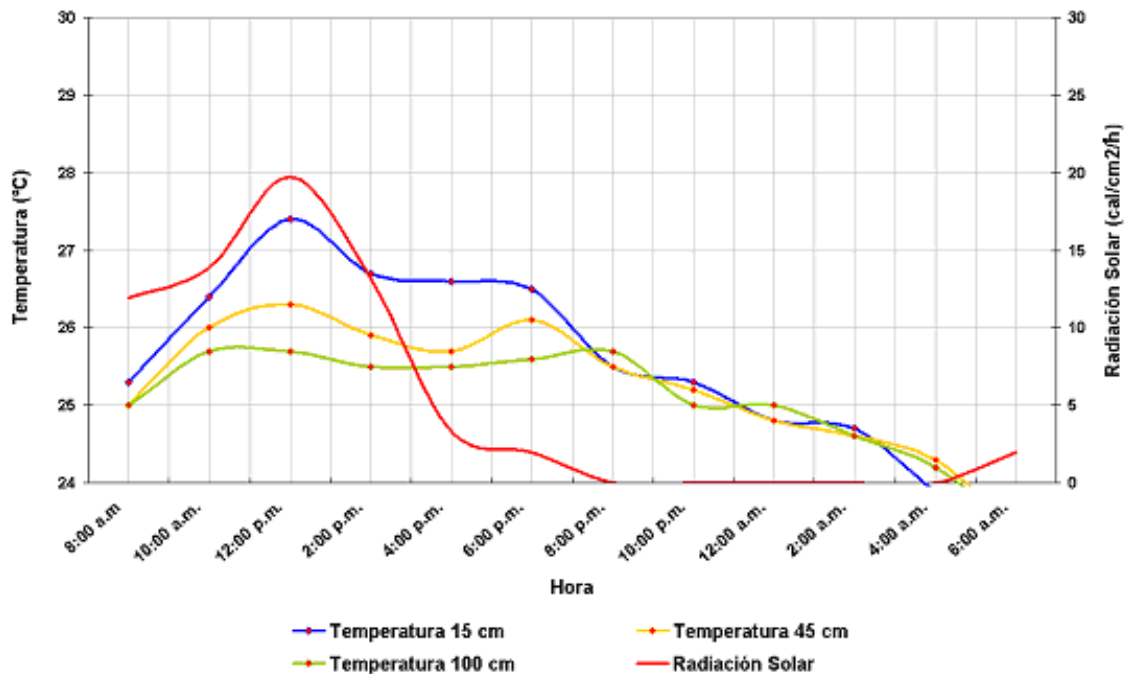


Figura IV.10. Influencia de radiación solar en la variación horaria de temperatura en diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga Orgánica 306 Kg DBO/ha.d. Fecha: 19/08/06.

La radiación solar tiene mayor influencia en la temperatura del estrato superior, mientras que en niveles más profundos es baja.

La variación horaria de la temperatura en las diferentes profundidades, presenta termoclina durante el día, entre las 8:00 a.m. y 8:00 p.m. produciendo una pobre mezcla vertical, mientras que durante la noche, entre las 8:00 p.m. y 8:00 a.m., existe un buen mezclado vertical.

Capítulo IV. Resultados y Análisis

La mezcla durante la noche se debe posiblemente a que los gases emergentes de la actividad anaerobia que junto con la alta recirculación, pueden generar una concentración uniforme en ausencia de estratificación.

La estratificación diurna, también es reflejada por la variación de la temperatura, donde se presenta un perfil vertical decreciente de la variable, que promueve gradientes de temperatura entre estratos y a la formación de termoclina.

Haciendo analogía entre las variables O.D. y temperatura, durante el día la zona aerobia corresponde a la zona cálida del sistema (estrato superior), mientras que la zona anaerobia corresponde a la zona más fría (estratos inferiores).

Los resultados de la variación de la DBO_{5,20} en presencia (12:00 p.m.) y en ausencia (12:00 a.m.) de radiación, para muestras instantáneas, se exponen en la tabla IV.22.

Tabla IV.22. Distribución de la DBO_{5,20}, O.D. y temperatura en muestras instantáneas. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.

Fecha y Hora	Profundidad	DBO _{5,20} (mg / l)	O.D. (mg O ₂ / l)	Temperatura (°C)
19/08/06 12:00 p.m.	15 cm	13	12,8	27,0
	45 cm	88	1,4	26,0
	100 cm	69	1,0	26,0
	Entrada	126	3,6	27,0
	Salida Total	35	11,0	27,0
	Salida Soluble	13	11,0	27,0
20/08/06 12:00 a.m.	15 cm	91	0,4	25,0
	45 cm	87	0,4	25,0
	100 cm	86	0,4	25,0
	Entrada	69	5,7	26,0
	Salida Total	64	0,6	25,0

* Visibilidad del disco Secchi 15 cm penetración de la luz constante; carga hidráulica 4,5 MLD/ha.

Considerando los datos correspondientes a las 12:00 p.m., las variables O.D. y temperatura presentan la estratificación esperada. La $DBO_{5,20}$ en la superficie es de 13 mg/l y es mucho menor que en los estratos medio e inferior, 88 y 69 mg/l, respectivamente, esto demuestra que la mayor remoción de DBO se efectúa en la superficie y que en el estrato medio es donde se concentra la mayor cantidad de materia orgánica, lo que corresponde con las corrientes de recirculación que se forman en dicho estrato.

Para esta misma hora, la DBO del afluente, 126 mg DBO/l, comparada con la de los estratos medio e inferior, 88 y 69 mg DBO/l respectivamente, indica que a estas profundidades hay remoción de DBO. El oxígeno disuelto es menor a 1,0 mg/l, lo que indica condición facultativa y la concentración promedio de clorofila "a" es de 30 μ g/l. entonces la actividad fotosintética compensa, para algunas horas del día la tasa de oxígeno demandada en estos dos estratos.

Ahora, considérense los datos correspondientes a las 12:00 a.m., las variables O.D. y temperatura no muestran estratificación coincidiendo con la tendencia de los análisis anteriores. El oxígeno disuelto es menos de 0,4 mg/l, por lo que la laguna opera en condiciones anaerobias. La $DBO_{5,20}$ es similar en los tres estratos, lo que evidencia el buen mezclado vertical.

IV.3.- Tercera Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha.

IV.3.1.- Análisis Hidráulico.

La interpretación de los resultados se realizó de la misma forma que para las cargas anteriores

Ensayo N° 1 para un tiempo de 30 minutos después de la inyección del trazador:

Tabla IV.23. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min., después de la inyección del trazador.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	33,4	160	224	476	617	311
54	116	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
100	381	572	>1000	276	912	>1000

* Hora de inyección 12:00 p.m.

* Visibilidad del disco Secchi 12 cm, penetración de la luz constante; radiación promedio 319 cal / cm²d.

*Carga Orgánica 569 Kg DBO/ha.d.

Si se compara el estrato medio con el superior, se observa que la concentración promedio del primero es 10 veces mayor a la concentración de la superficie, demostrando que en presencia de alta recirculación, debido a mayor velocidad de afluente (ver apéndice C), es baja la transferencia de materia entre las capas. Cobrando valor el fenómeno de la estratificación como factor de resistencia al mezclado durante el día.

La recirculación para esta carga es más pronunciada y logra buen mezclado entre los estratos medio e inferior, reduciendo el estancamiento y favoreciendo la dispersión del lodo. Entonces, a mayor carga hidráulica mayor turbulencia en los estratos medio e inferior y menor volumen estancado en el fondo.

Ensayo N° 2 para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador:

Tabla IV.24. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	980	981	995	992	984	970
54	985	990	985	976	987	986
100	993	984	991	995	984	986

El perfil longitudinal correspondientes a un tiempo de 24 horas después de inyectado el trazador, muestra nuevamente el cambio hidráulico experimentado por la laguna, debido al conjunto de factores que influyen en la misma. Una vez más se comprueba el comportamiento hidráulico transitorio.

Al igual que en las cargas anteriores, los parámetros de la curvas C y F son descartados, a excepción del tiempo de retención medio. Sin embargo, los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla IV.25. Parámetros Hidráulicos. Carga hidráulica 6,5 MLD/ha.

Parámetros Asociados a la Curva C		
Tiempo de retención teórico, (d)	t_0	2,0
Tiempo de retención real, (d)	t	1,4
Tiempo de retención medio t/t_0 , (adimensional)	θ_c	0,71
Desviación del Flujo Pistón, (%)	θ_{pf}	54
Volumen muerto, (%)	V_m	31
Volumen efectivo, (%)	V_e	69
Dispersión, (adimensional)	d	8,0
Parámetros Asociados a la Curva F		
Fracción considerada flujo pistón, (%)	p	2
Fracción considerada mezcla completa, (%)	FMC	98
Fracción considerada como volumen muerto, (%)	V_m	35
Fracción considerada como volumen efectivo, (%)	V_e	65

*Carga Orgánica 569 Kg DBO/ha.d.

El valor del tiempo de residencia adimensional $\theta_c = 0,71$, indica la existencia de cortocircuito y volumen estancado, lo cual fue identificado en el análisis cualitativo.

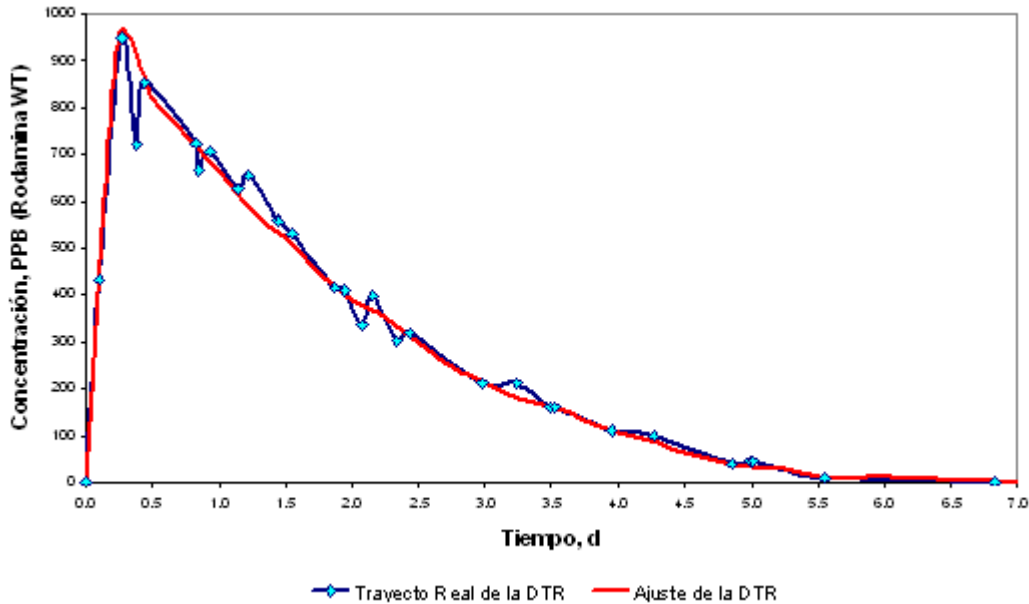


Figura IV.11. Curva C. Distribución de Tiempo de Residencia de la Laguna Facultativa de la P.E.T.A.-U.CV. Para una Carga Hidráulica de 6,5 MLD/ha.

Los máximos de la figura IV.11 posiblemente están asociados a actividades microbiológicas en la laguna. A continuación se presenta la tabla IV.26 donde se señala las horas de mayor intensidad.

Tabla IV.26. Máximos característicos de la DTR para la carga hidráulica de 6,5 MLD/ha.

Fecha	Hora	Día	C (t) (ppb)	Característica
29/08/2006	8:04 p.m.	0.26	948	Producción de Gases
30/08/2006	12:18 a.m.	0.44	854	Producción de Oxígeno
30/08/2006	12:12 p.m.	0.94	705	Producción de Gases
30/08/2006	7:00 p.m.	1.22	654	Producción de Gases
31/08/2006	5:30 p.m.	2.16	399	Producción de Gases
01/09/2006	12:02 a.m.	2.43	320	Producción de Oxígeno
01/09/2006	7:20 p.m.	3.23	213	Producción de Gases
02/09/2006	8:11 p.m.	4.27	100	Producción de Gases
03/09/2006	1:57 p.m.	5.01	43.8	Producción de Oxígeno

*Carga Orgánica 569 Kg DBO/ha.d.

En esta carga los máximos del gráfico VI. 11 son menos pronunciados, debido a que la turbulencia por recirculación es mayor y minimiza el efecto del mezclado vertical; y poco frecuentes, debido a que tiene un menor tiempo de retención real.

IV.3.2.- Parámetros físico-químicos.

A continuación se presenta los resultados de remoción de nitrógeno y fósforo.

Tabla IV.27. Remoción promedio de nitrógeno y fósforo, para una carga orgánica de 569 Kg DBO/ha.d.

Parámetro	Afluente	Efluente (Total)	Remoción Total (%)	Efluente (Soluble)	Remoción soluble (%)
DBO _{5,20} (mg/l)	87,0	58,0	33	20,0	77
NTK (mg/l)	21,4	19,9	7	14,1	34
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	16,3	13,3	18	-	-
Nitratos (mg/l)	0,485	-	-	0,354	27
Nitritos (mg/l)	0,025	-	-	0,028	-
Fósforo Total (mg/l)	3,75	3,07	18	-	-
Fósforo Solubles (ortofosfato) (mg/l)	2,65	-	-	2,37	11

** Visibilidad del disco Secchi 12 cm; radiación promedio 394 cal / cm² d; carga hidráulica 6,5 MLD/ha. Fecha: 15/08/06.

Para esta carga no se tiene datos de la biomasa algal. Sin embargo, considerando la tendencia de las dos primeras cargas de estudio, la concentración de clorofila “a” en el estrato superior debe ser menor a 134 µg/l, ya que para éste último estudio la carga orgánica aumentó en más de 200 unidades y el tiempo de retención real, 1,4 días, está por

debajo del tiempo aproximado de multiplicación celular algal, por lo que parte de las algas abandonan la laguna sin haberse reproducido.

Otro parámetro que indica la disminución de la concentración de fitoplancton es la remoción de nitrógeno. El nitrógeno total, 7%, se mantiene constante comparado con carga hidráulica 4,5 MLD/ha; sin embargo el NTK respecto a la soluble 34%, se reduce en un 10% con respecto a la carga anterior, 43% (4,5 MLD/ha).

Para la carga de 569 Kg DBO/ha.d se tienen los siguientes porcentajes de remociones 33% (total) y 77 % (soluble) de $DBO_{5,20}$; 7% (total) y 34% (soluble) de nitrógeno total Kjeldahl (NTK); 18% de fósforo total y 11% de ortofosfatos. Por lo que se la laguna se considera un sistema con remoción de nutrientes.

Los parámetros físico-químicos a lo largo del sistema se mantienen constantes para un momento en particular, al igual que las cargas anteriores, mostrando variaciones entre estratos. A continuación se muestra el promedio de los resultados para tres muestreos.

Tabla IV.28. Parámetros físico-químicos promedio a diferentes profundidades en la laguna facultativa. Carga orgánica de 569 Kg DBO / ha d.

Hora	Profundidad (cm)	O.D (mg/l)	Desviación Estándar (±)	pH	Desviación Estándar (±)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)	Desviación Estándar (±)	Conductividad (µS)	Desviación Estándar (±)	Temperatura (°C)	Desviación Estándar (±)
8:00 a.m.	18	0,4	0,2	7,3	0,2	209	6	574	28	25	0
	54	0,4	0,1	7,2	0,3	209	6	576	31	25	0
	100	0,4	0,1	7,2	0,3	208	5	572	28	25	0
2:00 p.m.	18	4,8	5,7	7,8	0,4	210	6	576	34	28	1
	54	0,6	0,1	7,5	0,0	212	2	590	33	26	0
	100	0,5	0,1	7,3	0,2	214	4	590	34	25	0
8:00 p.m.	18	0,6	0,1	7,4	0,2	207	6	590	13	26	1
	54	0,5	0,2	7,4	0,2	208	6	592	12	26	1
	100	0,4	0,2	7,3	0,3	208	6	597	14	25	1
2:00 a.m.	18	0,4	0,2	7,3	0,2	209	5	575	6	25	0
	54	0,3	0,2	7,2	0,3	208	2	576	7	25	0
	100	0,3	0,2	7,2	0,2	211	6	576	8	25	1

* carga hidráulica 6,5 MLD/ha.

Las variables para la tabla IV.28, no muestran estratificación pronunciada como en las cargas estudiadas anteriormente, esto se debe a que la profundidad de estudio del estrato superior se realizó a los 18 cm. y no corresponde al nivel de la zona eufótica, 12 cm. Ya que para cuando se fijó la profundidad de estudio en la metodología de trabajo, no se esperaba que la profundidad del disco secchi influyera significativamente en las variables físico-químicas.

A continuación se presenta la comparación de la remoción de DBO considerando el tiempo de retención y sin considerarlo.

Tabla IV.29. Comparación de la remoción de DBO considerando el tiempo de retención y sin considerarlo. Carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d.

	DBO Afluente (mg/l)	DBO Efluente (mg/)	Remoción (%)
DBO promedio sin considerar tiempo de retención	87	58 (total)	33 (total)
		20 (soluble)	77 (soluble)
Del 05/09/06 al 06/09/06	83	52 (total)	37 (total)
		20 (soluble)	76 (soluble)
Del 06/09/06 al 07/09/06	79	59 (total)	25 (total)
		22 (soluble)	72 (soluble)
Del 07/09/06 al 08/09/06	91	61 (total)	33 (total)
		20 (soluble)	78 (soluble)

*Carga hidráulica 6,5 MLD/ha.

Como se puede observar en la tabla IV.29, los porcentajes de remoción de DBO considerando el tiempo de retención son similares al valor promedio que no consideran ésta variable. Y como era de esperarse, el sistema es estable.

En la tabla que se expone a continuación se presenta un resumen de los parámetros físico-químicos para la tercera carga utilizada correspondientes al promedio de 4 muestras compuestas para la entrada y salida del sistema.

Tabla IV.30. Análisis físico-químicos para la carga orgánica de 569 DBO/ha.d.

Análisis	Afluyente	Efluyente	Remoción %
DBO _{5,20} mg/l	87	58	34
DBO _{5,20} Soluble mg/l	*	20	77
DQO Total mg/l	240	167	30
DQO Soluble mg/l	*	56	77
Nitrógeno total Kjeldahl mg/l -N	21,4	19,9	7
Nitrógeno total Kjeldahl soluble mg/l -N	*	14,1	34
Nitrógeno orgánico total mg/l -N	5,12	6,55	NA
Nitrógeno orgánico soluble mg/l -N	*	0,81	84
Nitrógeno amoniacal mg/l -N	16,3	13,3	18
Nitratos mg/l -N	0,49	0,35	27
Nitritos mg/l -N	0,006	0,009	NA
Fósforo solubles (Ortofosfatos) mg P/l	2,65	2,37	11
Fósforo total mg P/l	3,67	3,07	16
Sólidos totales mg/l	390	373	NA
Sólidos totales fijos mg/l	326	333	NA
Sólidos totales volátiles mg/l	261	245	NA
Sólidos totales disueltos mg/l	240	231	NA
Sólidos disueltos fijos mg/l	130	182	NA
Sólidos disueltos volátiles mg/l	87	102	NA
Sólidos suspendidos totales mg/l	64	40	NA
Sólidos suspendidos fijos mg/l	21	14	NA
Sólidos suspendidos volátiles mg/l	43	26	NA
Sólidos sedimentables ml/l	0,8	**	NA

* Se consideró el afluyente total.

**Inapreciable

NA: no aplica

Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha.

IV.3.3.- Balance Hídrico

El balance se realizó considerando el tiempo de retención del sistema.

Tabla IV.31. Comparación del Balance hídrico con la remoción de DBO, considerando el tiempo de retención del sistema para la carga hidráulica de 6,5 MLD/ha.

Fecha de Análisis	Caudal Afluyente (l/min)	Precipitación Promedio (l/min)	Evaporación Promedio (l/min)	Caudal Efluyente (l/min)	Pérdida de Caudal Afluyente (%)	Afluyente DBO mg/l	Remoción DBO Total (%)
Del 05/09/06 al 06/09/06	32,0	0,07	0,15	31,9	0,3	83	37
Del 06/09/06 al 07/09/06	32,0	0,00	0,32	31,7	1,0	79	25
Del 07/09/06 al 08/09/06	32,0	0,00	0,36	31,6	1,1	91	33

* Tiempo de retención teórico 2,0 días, tiempo de retención medio 1,4 días.

Para las fechas de estudio predominó la pérdida por evaporación con un promedio diario de 4,0 mm por día, lo que representa una pérdida aproximada de 0,8% del caudal afluyente durante el tiempo de retención en estudio. El aporte por precipitación promedio fue de 0,5 mm por día. Entonces, las pérdidas y aportes por evaporación y precipitación, respectivamente, son despreciables comparadas con el caudal afluyente.

Los porcentajes de remoción para la DBO_{5,20}, no son afectados por los parámetros evaporación y precipitación. Sin embargo, la fluctuación de la DBO_{5,20} del afluyente es la que tienen mayor peso sobre los cambios moderados en el porcentaje de remoción.

IV.3.4.- Parámetros Meteorológicos.

La figura IV.12 muestra la relación entre la radiación solar y el oxígeno disuelto en diferentes estratos del sistema.

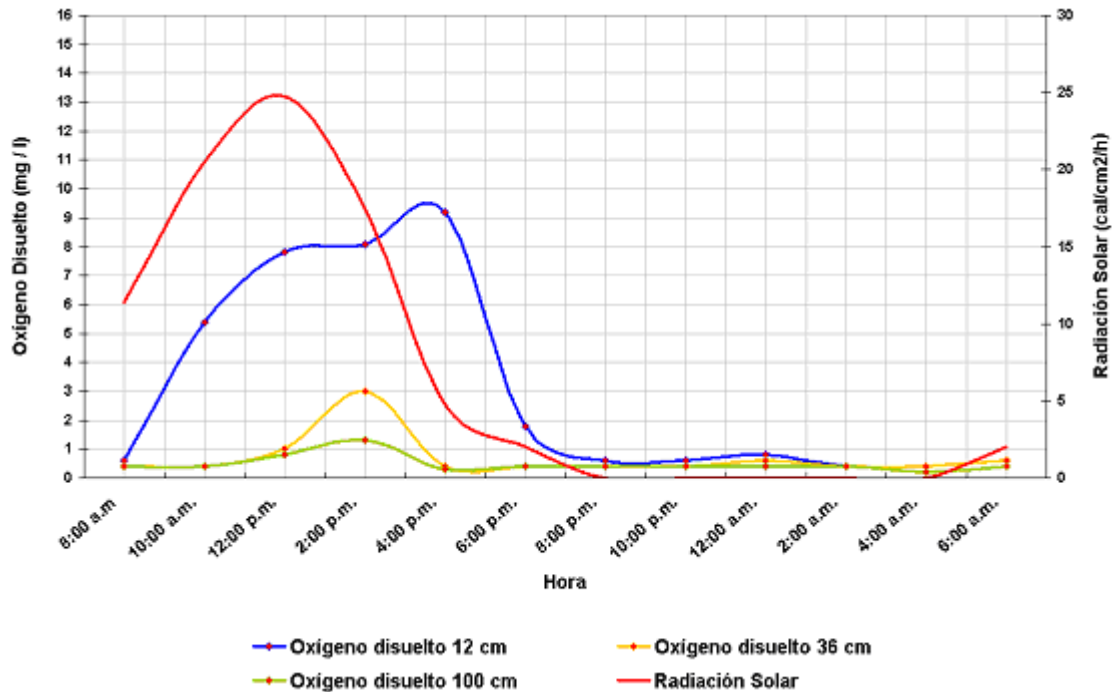


Figura IV.12. Influencia de radiación solar en la variación horaria de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Carga Orgánica 569 KgDBO/ha.d. Fecha: 07/09/06.

El estrato superior está definido por la penetración de la luz visible y corresponde a 12 cm de profundidad medida con el disco secchi. La hora para la cual se obtiene un máximo de O.D. es aproximadamente a las 4:00 p.m. resultado que era de esperarse de acuerdo a lo discutido en la carga 4,5 MLD/ha.

El rango de tiempo que permanece la laguna en condiciones anaerobias, O.D., está entre las 8:00 p.m. y las 8:00a.m. y es similar para las tres cargas de estudio

A diferencia de las cargas anteriores, el oxígeno disuelto no alcanza valores tan altos como 15 mg/l, lo cual está asociado a una mayor carga orgánica y mayor mezclado.

La radiación también influye en la variación horaria de temperatura en los diferentes estratos de la laguna. La figura IV.13 muestra la relación entre las variables.

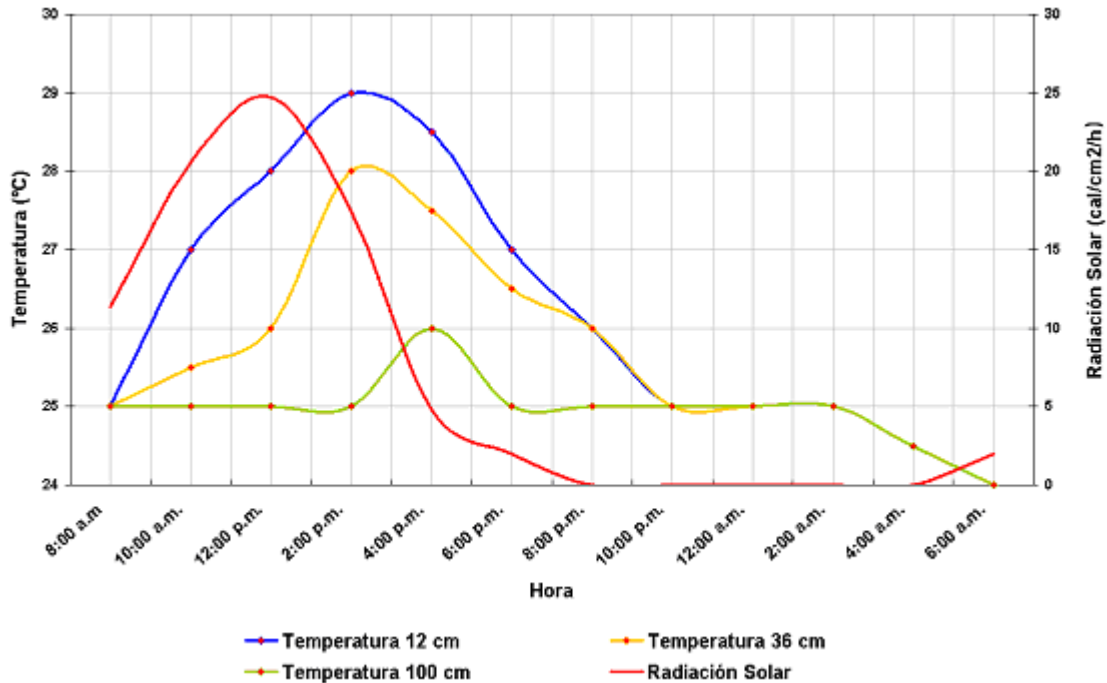


Figura IV.13. Influencia de radiación solar en la variación horaria de temperatura en diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga Orgánica 569 Kg DBO/ha.d. Fecha: 07/09/06.

La radiación solar tiene mayor influencia en la temperatura del estrato superior. La variación horaria de la temperatura en las diferentes profundidades, presenta termoclina durante el día, entre las 8:00 a.m. y 8:00 p.m. produciendo una pobre mezcla vertical, mientras que para el periodo nocturno (8:00 p.m. a.8:00 a.m.) existe un buen mezclado vertical.

Los resultados de la variación de la DBO_{5,20} en presencia (12:00 p.m.) y en ausencia (12:00 a.m.) de radiación, para muestras instantáneas, se exponen en la tabla IV.32.

Tabla IV.32. Distribución de la DBO_{5,20}, O.D. y temperatura en muestras instantáneas. Carga Orgánica 569 Kg DBO/ha.d.

Fecha y Hora	Profundidad	DBO _{5,20} (mg / l)	O.D. (mg O ₂ / l)	Temperatura (°C)
07/09/06 12:00 p.m.	12 cm	44	7,8	28,0
	36 cm	70	1,0	26,0
	100 cm	62	0,8	25,0
08/09/06 12:00 a.m.	12 cm	66	0,4	25,0
	36 cm	67	0,4	25,0
	100 cm	69	0,4	25,0

* Visibilidad del disco Secchi 12 cm penetración de la luz constante; carga hidráulica 6,5 MLD / ha.

Para las 12:00 p.m. el estrato superior presenta una DBO_{5,20} menor a la de los estratos inferiores, sin embargo, se tiene que no es significativamente comparada con los resultados de la carga anterior 4,5 MLD/ha, ésto se debe al aumento de la turbulencia en el sistema que permite un mejor mezclado vertical durante la estratificación.

Para las 12: a.m. como era de esperarse, la DBO_{5,20} de los tres estratos son similares.

IV.4.- Estudio comparativo entre las cargas

El modelo de dispersión de Levenspiel no aplica a la laguna en estudio para las cargas hidráulicas 2,0; 4,5 y 6,5 MLD/ha ya que el sistema no cumple las condiciones del mismo.

Los parámetros obtenidos a partir de la curva C y F no aplican a la laguna para las cargas hidráulicas (2,0; 4,5 y 6,5 MLD/ha) ya que estas se utilizan para interpretar flujo estable y el sistema presenta hidráulica transitoria.

Para las tres cargas de operación, prevalece un comportamiento hidráulico transitorio, que está asociado a diversos factores que interactúan en el sistema.

La laguna opera en condiciones facultativas durante el día (aproximadamente entre las 8:00 a.m. y 8:00 p.m.) y en la noche (para el horario complementario del día) las condiciones son anaerobias y el mezclado es homogéneo.

De acuerdo al análisis cualitativo las tres cargas de operación presentan cortocircuito hidráulico y recirculación, con tendencia a aumentar la recirculación y disminuir el volumen muerto, con el aumento de la carga hidráulica.

Tabla IV.33. Variables comparativas para las tres cargas de operación.

Visibilidad del Disco Secchi (cm)	Clorofila a ($\mu\text{g/l}$)	Tiempo de Retención Real (d)	Carga Hidráulica (MLD/ha)	Carga Orgánica (KgDBO/ha.d)
18	344	5,4	2	231
15	134	2,0	4,5	306
12	-	1,4	6,5	569

De acuerdo a la tabla IV.33, la variable de mayor influencia en la turbidez del sistema es la carga hidráulica (velocidad del afluente), ya que un aumento aproximado de 2 unidades en la carga hidráulica refleja una reducción de 3 unidades en el nivel de visibilidad del disco secchi. El aumento de la velocidad del afluente, debido al aumento de la carga hidráulica, reduce la profundidad de la zona eufótica.

La laguna presentó estabilidad físico-química para las tres cargas de operación. Los parámetros temperatura, pH, O.D., alcalinidad y conductividad no muestran fluctuación a lo largo del sistema, pero si presentan fluctuaciones a las diferentes profundidades y éstas corresponden a la actividades microbiológicas e hidráulicas del sistema.

Los géneros flagelados responsables de la estratificación diurna son: *Euglena sp.*, *Pyrobotrys sp* y *Chlamydomonas sp*

La profundidad de la zona eufótica es una buena aproximación del nivel de estratificación del sistema, ya que el fitoplancton se concentra en la superficie de acuerdo a la penetración de la luz y las variables físico-químico son afectadas por este fenómeno.

La reducción en la concentración de clorofila “a”, como se puede ver en la tabla IV.33, para la carga hidráulica 4,5 MLD/ha respecto a la carga 2,0 MLD/ha, es consecuencia de: menor tiempo de retención para su reproducción; menor profundidad eufótica, para demandar energía; y mayor carga orgánica, lo que reduce su biodiversidad.

Tabla IV.34. Comparación de la remoción de nitrógeno y ortofosfato soluble para las tres cargas de operación.

Parámetro	Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha Clorofila "a" 18 cm. 2:00 p.m. 344 (µg/l)	Carga Hidráulica 4,5 MLD/ha Clorofila "a" 15 cm. 2:00 p.m. 134 (µg/l)	Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha Disco Secchi 12 cm.
	Remoción (%)		
NTK (mg/l)	26	7	7
NTK soluble (mg/l)	54	43	34
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	45	29	18
Nitratos (mg/l)	-	27	27
Nitritos (mg/l)	-	10	-
Fósforo Solubles (ortofosfato) (mg/l)	30	34	11
Fósforo Total (mg/l)	-	-	18

El potencial de hidrógeno promedio en la laguna es menor a 9,0 por lo que las condiciones no están dadas para la remoción de nitrógeno gaseoso (amoniacal) incorporándolo al ambiente. Entonces la remoción de nitrógeno total se logra mediante la incorporación de nitrógeno en la biomasa.

Para la remoción de la variable NTK, una reducción del tiempo de retención es más significativa que el aumento de la carga orgánica. Para la carga 2,0 MLD/ha el tiempo de retención real es de 5,4 días, la carga orgánica es de 231 Kg DBO/ha.d y el porcentaje de remoción NTK es 26%; mientras que para la carga 4,5 MLD/ha el tiempo de retención real es 2,0 días, la carga orgánica es de 306 Kg DBO/ha.d y el porcentaje de remoción NTK es 7%. La diferencia de la remoción de nitrógeno entre cada caso es alta y corresponde con

una alta reducción del tiempo de residencia, mientras que la variación de la carga orgánica es moderada.

Comparando los resultados de la carga 4,5 MLD/ha, con la última carga de operación 6,5 MLD/ha, donde el tiempo de retención real es 1,4 días, la carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d y el porcentaje de remoción de NTK 7%. La diferencia entre los tiempos de retención real no es significativa y el porcentaje de remoción de nitrógeno es igual, mientras que la carga orgánica tuvo un incremento considerable. Por lo que se demuestra que la variable de mayor peso en la remoción de NTK es el tiempo de retención.

Entonces, altas reducciones del tiempo de retención del agua residual, tiene como consecuencia una menor remoción de nitrógeno total Kjeldahl, debido a que el reactor reduce la biomasa algal, ya que se crea un desequilibrio por la incorporación del fitoplancton en el efluente antes de un tiempo próximo al de su multiplicación (1,6 días Mendonça, 2.000).

El nitrógeno favorece la producción de nitrógeno orgánico, para las tres cargas de estudio hubo un incremento promedio respecto al afluente de 1,4 mg-N/l. Este valor indica incorporación de nitrógeno a la biomasa de la laguna, pero no presenta una relación con la concentración de fitoplancton.

Los porcentajes de remoción de nitrógeno amoniacal son menores para una disminución del tiempo de retención, a menor tiempo de retención mayor cantidad de nitrógeno amoniacal se incorpora al efluente y éste no es aprovechado por las algas y bacterias.

Los porcentajes de remoción de nitritos y nitratos, indican consumo de estas formas de nitrógeno en la laguna por la biomasa, en algunas ocasiones.

El ortofosfato es la forma del fósforo adecuada para la nutrición de los microorganismos en la laguna. Ésta variable físico-química mostró incremento de su concentración con la carga orgánica de la siguiente forma: 2,05; 2,45; y 2,65 mg F/l como ortofosfato soluble, correspondiente a 231; 306; y 569 Kg DBO/ha.d respectivamente, el

estudio de esta variable indica que la biomasa presente remueve 30% de ortofosfato soluble para las dos primeras cargas y baja bruscamente 11% para la última carga.

Entonces, el porcentaje de remoción de fósforo como ortofosfato soluble disminuye con un aumento significativo de la carga orgánica para un tiempo de retención próximo al de la multiplicación de las algas (1,6 días), debido a que éste nutriente es incorporado en el organismo de las algas en menor proporción que el nitrógeno y carbono, carbono/nitrógeno/fósforo: 106:15:1. Por lo que un aumento en la disponibilidad de fósforo debido al incremento de la carga orgánica y sumado un tiempo de retención desfavorable para la reproducción algal reduce su remoción considerablemente, carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d (tiempo de retención real 2,0) remoción de ortofosfato correspondiente 34%; carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d (tiempo de retención real 1,4 días) remoción de ortofosfato correspondiente 11%.

La laguna no presentó infiltraciones. Además, la evaporación y precipitación, son despreciables frente al caudal afluente y no presentan influencia sobre la estabilidad del sistema.

La dirección predominante del viento durante los estudios fue noreste-suroeste. Sin embargo, ésta variable no promueve mezclado, ya que, solo influye en el espejo de la laguna, acumulando algas muertas en suspensión a la salida del sistema. Tampoco contribuye con la reaireación del sistema.

La radiación solar es el factor meteorológico de mayor influencia en el sistema. Su presencia y variación en el tiempo promueve los cambios hidráulicos, físico-químicos y biológicos en el volumen de agua.

Estudio Comparativo de los parámetros físico-químicos con las normas ambientales vigentes.

A continuación se presenta la tabla IV.35, donde se comparan los valores obtenidos para el efluente de la laguna facultativa con la normativa ambiental para la descarga de aguas residuales.

Tabla IV.35. Comparación de los análisis físico-químicos con la normativa venezolana vigente.

Parámetros	Gaceta Oficial *	Carga 2,0 MLD/ha	Carga 4,5 MLD/ha	Carga 6,5 MLD/ha
		Efluente		
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	80	52	61	40
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	0,2	0	0
DBO _{5,20} total (mg/l)	60	53	46	58
DQO total (mg/l)	350	157	133	167
Nitrógeno total (mg N/l)	40	17,9	16,4	19,9
Fósforo total (mg P/l)	10	-	-	3,07

*Gaceta Oficial N° 5021Extraordinario (Decreto 883), 1.995.

La laguna puede operar cargas hidráulicas menores o iguales a 6,5 MLD/ha con cargas orgánicas asociadas a afluentes con concentraciones orgánicas de DBO_{5,20} próximos a 90 mg/l y permitir un efluente que cumpla con la Normativa Ambiental Venezolanas según la Gaceta Oficial N° 5021 Extraordinario en el decreto 883.

Capítulo V, Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

- ✓ Los parámetros obtenidos a partir de la curva C y F, así como el modelo de dispersión de Levenspiel no aplica a la laguna facultativa ubicada en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas U.C.V., debido a que no permiten la interpretación de la hidráulica del sistema. Sin embargo, el estudio discreto de la distribución del trazador en el volumen de la laguna permite definir el comportamiento hidráulico cualitativo.
- ✓ Para las tres cargas de operación, 2,0; 4,5; y 6,5 MLD/ha., prevalece un comportamiento hidráulico transitorio, durante el día la laguna facultativa se estratifica y por la noche presenta mezclado homogéneo, fenómeno que está asociado a diversos factores que interactúan en el sistema, como lo son, la radiación solar y la actividad microbiológica entre otros.
- ✓ De acuerdo al análisis cualitativo, para las tres cargas de operación se presenta cortocircuito hidráulico y recirculación.
- ✓ El aumento de la carga hidráulica promueve mayor recirculación y turbidez del sistema, así como también un aumento del mezclado entre los estratos medio e inferior.
- ✓ Para las tres cargas operadas, el sistema presentó zonas estancadas en el estrato inferior durante la estratificación diurna y ausencia de las mismas durante el mezclado homogéneo nocturno.
- ✓ Los parámetros evaporación y precipitación, son despreciables frente al caudal afluente; éste último es igual al caudal efluente; y no presentan influencia sobre la estabilidad del sistema.

- ✓ La laguna no presentó infiltraciones.

- ✓ Una fuerte precipitación causa dilución en el afluente y tienen como consecuencia la alteración de los resultados físico-químicos.

- ✓ La radiación solar es el factor meteorológico de mayor influencia en el sistema. Su presencia y variación en el tiempo promueve los cambios hidráulicos, físico-químicos y biológicos en el volumen de agua.

- ✓ La dirección del viento predominante fue noreste-suroeste, coincidiendo con la dirección entrada-salida del sistema, sin embargo, no promueve mezclado ni contribuye con la reaireación, pero si ocasiona la acumulación de algas muertas a la salida de la laguna, incorporándolas finalmente en el efluente.

- ✓ Los parámetros temperatura, pH, O.D., alcalinidad y conductividad no muestran fluctuación a lo largo del sistema, pero si presentan fluctuaciones a las diferentes profundidades y éstas corresponden a la actividades microbiológicas e hidráulicas.

- ✓ La laguna presentó estabilidad físico-química a pesar de no presentar estabilidad hidráulica.

- ✓ El sistema opera en condiciones facultativas en el transcurso del día y durante la noche las condiciones son anaerobias, situación análoga a la hidráulica transitoria.

- ✓ La reducción en la concentración de clorofila “a” para un aumento en la hidráulica de 2,0 a 4,5 MLD/ha, es consecuencia de: menor tiempo de retención para su reproducción de las algas; menor profundidad eufótica para demandar energía; y mayor carga orgánica, lo que reduce su biodiversidad.

- ✓ La remoción de nitrógeno total se reduce significativamente con un aumento de la carga hidráulica debido a la reducción de la biomasa algal.

- ✓ Un aumento en la disponibilidad de fósforo debido al incremento de la carga orgánica y sumado un tiempo de retención desfavorable para la reproducción algal reduce la remoción de ortofosfato soluble considerablemente: carga orgánica 231 Kg DBO/ha.d (tiempo de retención real 5,4) remoción de ortofosfato correspondiente 30%; carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d (tiempo de retención real 2,0) remoción de ortofosfato correspondiente 34%; carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d (tiempo de retención real 1,4 días) remoción de ortofosfato correspondiente 11%.

- ✓ En la laguna hubo presencia de los géneros flagelados *Euglena sp.* *Pyrobotrys sp* y *Chlamydomonas sp*; y debido a su facultad para desplazarse se concentran en la zona eufótica durante el día.

- ✓ El oxígeno disuelto en el volumen de agua es aportado exclusivamente por la actividad fotosintética, por lo que, su concentración es mayor en la superficie durante el día, y permite mayor remoción de materia orgánica en éste estrato.

- ✓ El porcentaje de remoción respecto a la $DBO_{5,20}$ considerando salida total disminuye con el aumento de la carga orgánica, promediando 52%, 46% y 33% para las cargas 231 Kg DBO/ha.d (2,0 MLD/ha), 306 Kg DBO/ha.d (4,5 MLD/ha) y 569 Kg DBO/ha.d (6,5 MLD/ha) respectivamente. Mientras que el porcentaje de remoción respecto a la $DBO_{5,20}$ considerando salida soluble promedió 87%, 78% y 77% para las cargas 231, 306 y 569 Kg DBO/ha.d respectivamente.

- ✓ La eficiencia de remoción de la laguna facultativa para las cargas orgánicas de 231; 306; y 569 Kg DBO/ha.d, permiten obtener un efluente que cumple con la Normativa Ambiental Venezolanas según Gaceta Oficial N° 5.021 Extraordinario Decreto 883.

- ✓ Los factores de mayor influencia en la eficiencia, respecto a la remoción de materia orgánica carbonácea y los nutrientes fósforo y nitrógeno, en la laguna facultativa son: el comportamiento hidráulico; el nivel del profundidad del disco secchi; la radiación solar; el oxígeno disuelto; el tiempo de retención; las variación de la carga orgánica e hidráulica en el afluente; y la concentración de fitoplancton, así como la presencia de los géneros flagelados.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda el cambio del dispositivo de entrada a la laguna con la finalidad de reducir corto circuitos y recirculación en el sistema.
- ✓ Se recomienda utilizar la metodología empleada en la caracterización de la distribución del trazador en volumen del sistema para la interpretación cualitativa del flujo en condición hidráulica transitoria en la laguna facultativa P.E.T.A.-U.C.V.
- ✓ Realizar estudios más específicos del comportamiento hidráulico transitorio de la laguna facultativa ubicada en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas U.C.V.
- ✓ Evaluar los parámetros físico-químicos oxígeno disuelto, pH y temperatura en línea en el volumen de la laguna a diferentes profundidades considerando el nivel del disco secchi, para establecer una relación más específica entre éstas variables, la remoción de $DBO_{5,20}$ y la estratificación del sistema

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

1. APHA, AWWA, WEF, (1.999). “Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater”. 20th Edition. Washington. U.S.A.
2. ARBOLEDA V., JORGE. (1.973). “Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua.” CEPIS. Págs. 189 a 201.
3. ARBOLEDA V., JORGE. (2.000). “Teoría y Práctica d la Purificación del Agua.” Tercera edición. McGraw-Hill. Santa Fe de Bogotá, D.C., Colombia. Capítulo 7, págs. 354 a 362.
4. CEPIS/OPS/PUB/04.112. (2.005). “Tratamiento de Aguas para Consumo Humano Planta de Filtración Rápida”. Edición Digital 04.112 Original Español. Lima-Perú. Manual III Capítulo 2.
5. DE SOUSA G; WILLIAMS, F; VITALE, O. (1.988). “Determinación de Tratamiento en Sistemas de Lagunas de Estabilización Operando en Serie”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Caracas-Venezuela.
6. DÍAZ M; RUBIO I. (2.006). “Estudio de la Distribución Espacial del Fitoplancton en la Laguna de Estabilización Facultativa Ubicada en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado, Convenio UCV-UFPS, Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Escuela de Ingeniería de Producción Biotecnológica. San José de Cúcuta-Colombia.

7. ESCALONA, I. (2.000). “Caracterización del Colector Marginal Izquierdo Río Valle”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Caracas-Venezuela.
8. ESPINOZA, I. (1.995). “Selección Diseño, Construcción y Evaluación de los Dispositivos de Entrada y Salida para las Lagunas Facultativa y Aerobia de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Caracas-Venezuela.
9. FIGUROA, C.; PAZ, F. (1.998). “Desarrollo y Adaptación de una Metodología para el uso de Trazadores Radiactivo en la Evaluación del Comportamiento Hidráulico de las Lagunas de Estabilización Ubicadas en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas-U.C.V.”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Caracas-Venezuela.
10. FOGLER, Scott. (2.001). “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. Tercera edición. Prentice-Hall. México. Capítulo 13, Págs. 809 a 830.
11. HIDROVEN. (1.995). “Memoria y Cuentas del año 1995”. Caracas - Venezuela.
12. INSTITUTO NACIONAL DE OBRAS SANITARIAS, INOS. (1976); “Normas para la Elaboración de Proyectos de Sistemas de Tratamiento de Aguas Servidas Urbanas”. Volumen III, Caracas - Venezuela.
13. KWONG E.; SALAS N.; GUTIÉRREZ E.; LÓPEZ F. (2.005); “Distribución del Oxígeno Disuelto, pH y Temperatura, de la Laguna Facultativa de la Planta Maracaibo Sur”. Centro de Investigación del Agua. Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela.

14. LEVENSPIEL, O. (1.990). “Ingeniería de las Reacciones Químicas”. Tercera edición. Editorial Reverté Barcelona España. Capítulo 9, Págs. 277 a 309.
15. MÁRQUEZ, A. GUEVARA, E. “Descripción y Evaluación del Funcionamiento de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en una Industria Avícola”. Revista Ingeniería U.C. Volumen 11, N° 2 Págs. 92-101, 2004. Carabobo – Venezuela.
16. MENDOÇA, S. (2.000); “Sistemas de Lagunas de Estabilización”. Editorial M^C GRAW HILL. Santa Fe de Bogotá, D.C., Colombia. Capítulos varios.
17. METCALF & EDDY (1.985). “Tratamiento, Evaluación y Reutilización de Agua Residual”. 2da edición. M^C GRAW HILL. Barcelona España. Capítulo 7, Págs. 252 a 271.
18. MIDDLEBROOKS E.; MIDDLEBROOKS C.; REYNOLDS J.; WATTERS G.; REED S.; GEORGE D. (1.982). “Wastewater stabilization lagoon design, performance and upgrading”. Editorial Macmillan Publishing Co., Inc. New York, E.E.U.U. Capítulo 4, Págs. 206 a 216.
19. ODUM (1986). “Fundamentos de Ecología”. Editorial Interamericana. México. Pág 422.
20. RAMÍREZ, M.; REGARDIZ, F. (1.991); “Comportamiento Hidráulico en las Lagunas de Estabilización Ubicadas en la PETA- UCV”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Caracas-Venezuela.

Bibliografía

21. RENGEL, M. (1.977); “Lagunas de Estabilización para el Tratamiento de Aguas Residuales de Origen Domestico”. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Mérida, Venezuela. Capítulo 1, Págs. 2 a 18.

22. REPÚBLICA DE VENEZUELA. (1.995) “*Gaceta Oficial N° 5.021 Extraordinario (Decreto 883)*”. Caracas - Venezuela.

23. TREYBAL, R. (1.998). “Operaciones de Transferencia de Masa”. 2^{da} Edición. Editorial McGraw-Hill. México. Capítulos 7 y 12.

24. ROMERO, J. (1.999); “Tratamiento de Aguas Residuales por Lagunas de Estabilización”. 3^{era} Edición. Editorial Alfaomega. México, D.F. Capítulos varios.

25. VARGAS L.; CÁRDENAS C.; HERNÁNDEZ M.; ARAUJO I.; YABROUDI S.; LÓPEZ F.; SAULES L.; DELGADO J. (2.004); “Efecto de las Microalgas en la Remoción de los Compuestos Nitrogenados Presentes en la Laguna Facultativa de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales”. Centro de Investigación del Agua. Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela.

Apéndice

APÉNDICE A

A I. Caudales de operación

El caudal de operación se estimó de acuerdo a las cargas orgánicas que se deseaban operar, 250, 500 y 750 (Kg DBO_{5 20} / ha*d). Sin embargo, debido a la fluctuación de la DBO del afluente en el tiempo, no se logro obtener dichas cargas, y los resultados fueron los siguientes:

Tabla A 1. Variación de la DBO del afluente en el tiempo y su relación con el caudal de operación.

Fechas	DBO Promedio (mg/l)	Caudal (L/min)	Carga Hidráulica (MLD/ha)	Carga Orgánica (Kg DBO/ha.d)
Del 25/05/06 al 15/06/06	111	10	2,0	231
Del 08/08/06 al 19/08/06	68	22	4,5	306
Del 05/09/06 al 08/09/06	87	32	6,5	569

* La variación de la DBO en el tiempo se debe a que los estudios realizados entre los meses de agosto y septiembre coinciden con la época vacacional y parte de la población se desplaza a otras ciudades.

A II. Cálculo tipo para el primer caudal de operación

La estimación del primer caudal de operación se realizó considerando el último registro de la 120 mg DBO_{5 20} /l en la P.E.T.A.

$$Q = \frac{C.O * A_s}{DBO_{520}} * (6,944 * 10^{-2}) \quad (A.1)$$

donde:

Q: caudal de líquido, (L/mim).

C.O: Carga Orgánica, (Kg DBO_{5 20}/ha*d).

A_s : Área superficial de la laguna, (m^2).

Factor de conversión: $6,944 \cdot 10^{-2}$ ($ha \cdot mg \cdot L / m^2 \cdot Kg \cdot min$).

Luego el caudal para la menor carga orgánica es:

$$Q = \frac{250 \cdot 70.5}{120} \cdot (6,944 \cdot 10^{-2}) = 10,20 \frac{L}{min} \quad (A.2)$$

Considérese el bosquejo (figura A.1) del canal de aproximación, del balance de energía entre el punto N° 1 y el punto N° 2, se tiene:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + Z_2 \quad (A.3)$$

donde:

V_i : Velocidad en el punto 1 y 2 respectivamente, (m/s).

P_i : Presión en el punto 1 y 2 respectivamente, (Pa).

Z_i : Cotas de los puntos 1 y 2 respectivamente, (m).

g : aceleración de la gravedad, ($9,8 \text{ m/s}^2$).

ρ : Densidad del líquido, (Kg/m^3).

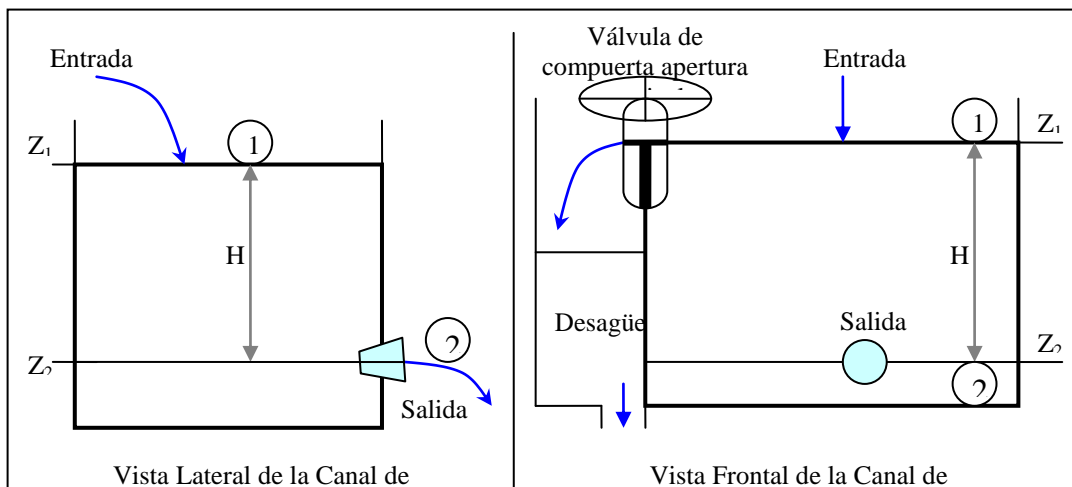


Figura A.1. Bosquejo Representativo de la Canal de Aproximación en el Distribuidor de Flujo de P.E.T.A.-U.C.V.

Consideraciones del balance:

- La presión en el punto 1 y 2 son iguales entre sí y su valor es la presión atmosférica.
- Se supone que la densidad del agua residual no varía entre el punto 1 y 2.
- La altura en el punto 1 es constante por lo tanto la velocidad en ese punto permanece constante e igual a cero (0,0 m/s)
- El orificio a la salida del canal es circular de diámetro aproximado 1,15 cm

Simplificando la ecuación anterior:

$$Z_1 - Z_2 = H = \frac{V_2^2}{2 * g} \quad (\text{A.4})$$

donde:

H: altura del líquido (m)

De la definición de caudal a través de un orificio se tiene:

$$Q_2 = V_2 * A_2 \quad (\text{A.5})$$

donde:

Q₂: Caudal en el punto 2, (m³/s).

V₂: Velocidad del líquido en el punto 2, (m/s).

A₂: Área del orificio circular de salida del líquido en el punto 2, (m²).

Luego sustituyendo 3 en 2 para luego despejar la altura del líquido H:

$$H = \frac{\left(\frac{Q}{\frac{\pi}{4} * D^2} \right)^2}{2 * g} \quad (\text{A.6})$$

donde:

D: Diámetro del orificio, (m).

Ahora sustituyendo los valores correspondientes y evaluando: H = 14*10⁻² m.

APÉNDICE B

Balance Hídrico

B I. Cálculos previos para la determinación de infiltraciones y/o percolaciones.

Para verificar la existencia de posibles infiltraciones y/o percolaciones, se preciso condiciones de muestreo en las cuales variables como evaporación y precipitación no influyeran en el sistema. El período donde la evaporación no fue significativa debido a la radiación solar, es desde las 8:00 p.m. hasta las 8:00 a.m., el cual está sujeto a condiciones climáticas locales que, por lo general, permanecen constantes. Así mismo, se consideró que 24 horas antes del muestreo no hubo precipitaciones, ya que es el tiempo mínimo de registro de pluviosidad en la estación meteorológica.

Otras variables consideradas, son aquellas que contribuyen a la transferencia de agua al aire (humidificación) para el periodo seleccionado, las cuales son: velocidad promedio del viento, humedad relativa y temperatura ambiente entre otras.

Tabla B 1. Condiciones meteorológicas promedio para un periodo entre las 8 p.m. y 8 a.m.

Variable	Valor	Unidad
Presión	697	mm Hg
Velocidad del viento	<1	m/s
Humedad Relativa	96	%
Temperatura Ambiente	22,0	°C
Precipitación sobre la laguna 24 h antes.	0,0	l / s
Precipitación sobre la laguna durante la medición	0,0	l / s

* La dirección del viento predominante se mantiene constante NE → SO y coincide con la dirección entrada-salida de la laguna. Fechas de registro consideradas: del 25/05/06 al 15/06/06.

De acuerdo a los datos de la tabla B 1., la humedad relativa del aire es bastante alta (96%) y la temperatura del aire 22 °C, es menor a la del agua, 24 °C. Estos datos suponen que la transferencia de aguas al aire, para el tiempo en cuestión, es baja. Sin embargo, es necesario determinar cantidad de agua transferida para afirmar que es despreciable frente al caudal afluente.

B II. Evaporación por secado superficial. (Treybal, 1998)

Cuando una película de líquido se expone al aire, relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie. La rapidez a la cual se evapora la humedad puede describirse en función del coeficiente de transferencia de masa “Ky” del gas y de la diferencia de humedad en la corriente principal “Y” y la superficie líquida “Ys”. Para circulación de aire tangencial se tiene la siguiente ecuación:

$$N_c = K_y (Y_s - Y) \quad (B.1)$$

donde:

Nc: Rapidez de evaporación, (Kg/m² s)

Ky: Coeficiente de transferencia de masa de la fase gaseosa, (Kg/m² s)

Ys: Humedad absoluta a saturación en la superficie del líquido, (Kg agua/ Kg aire).

Y: Humedad absoluta en el aire, (Kg agua/ Kg aire).

Considerando las siguientes condiciones:

- El coeficiente Ky permanecerá constante siempre y cuando no cambie la velocidad y dirección del viento sobre la superficie.
- La temperatura de la superficie alcanza el equilibrio, entonces la rapidez del flujo de calor en el entorno de la superficie es exactamente igual a la rapidez de absorción de calor, por lo que la rapidez de evaporación permanece constante en el valor Nc.

Si se cumplen las consideraciones anteriores, el flujo de evaporación y el flujo de calor están relacionados por la siguiente ecuación:

$$N_c \lambda_s = q \quad (B.2)$$

donde:

q: Calor total que llega a la superficie del líquido, (J/m² s).

λs: Calor latente de evaporación para el agua, (J/Kg).

Nc: Rapidez de evaporación, (Kg/m² s).

Por lo que la rapidez de secado de la superficie puede calcularse por:

$$\frac{(Y_s - Y) * \lambda}{hc / Ky} = \left(1 + \frac{Uk}{hc}\right) * (T - T_s) + \frac{hr}{hc} * (T_r - T_s) \quad (B.3)$$

donde:

Ky: Coeficiente de transferencia de masa de la fase gaseosa, (Kg/m² s)

Ys: Humedad absoluta a saturación en la superficie del líquido, (Kg agua/ Kg aire).

Y: Humedad absoluta en el aire, (Kg agua/ Kg aire).

λs: Calor latente de evaporación para el agua, (2440383 J/Kg). *estimada a la temperatura del agua, por el simulador de procesos químicos PRO II.

hc: Coeficiente de transferencia de calor por convección, (W/m² K).

Uk: Coeficiente de transferencia de calor global, (W/m² K).

hr: Coeficiente de transferencia de calor por radiación, (W/m² K).

T: temperatura del aire, (K).

Ts: Temperatura de la superficie líquida, (K).

Tr: temperatura de la superficie que irradia, (K).

B III. Cálculo tipo de la evaporación por secado superficial.

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por conducción.

Después de haber realizado un cálculo iterativa se encontró que la temperatura de superficie es Ts = 21,5 °C. Entonces la temperatura de película (Tp) se calcula como:

$$T_p = \frac{295,0 + 294,5}{2} = 294,8 \text{ K} \quad (B.4)$$

Las propiedades del aire se calcularon por ajuste, realizado a partir de simulaciones en PRO II. La difusividad térmica (α), conductividad térmica (k) y viscosidad cinemática (ν) se presentan a continuación:

$$\alpha = (-8E-8 * (294,8)^3 + 0,0002 * (294,8)^2 + 0,0258 * (294,8) - 2,8903) * 1E-6$$

$$\alpha = 2,0 * E-5 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = (1E-8 * (294,8)^3 - 5E-5 * (294,8)^2 + 0,1033 * (294,8) - 0,6836) * 1E-3$$

$$k = 2,6 * E-2 \text{ W} / \text{m.K}$$

$$\nu = (0,0007 * (294,8)^{1,7638}) * 1E-6 = 1,6 * E-5 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Ec. (B.5.a, B.5b, y B.5.c)

- Cálculo del número de Reynolds (Re):

$$\text{Re} * de = \frac{V * de}{\nu} = \frac{1,0 \text{ m/s} * 1,77E-2 \text{ m}}{1,6 * E-5 \text{ m}^2 / \text{s}} = 1.115 \quad (\text{B.6})$$

de: diámetro equivalente de la sección transversal del flujo de aire, [$4 * (\text{área transversal}) / \text{perímetro}$], (0,0177 m).

- Cálculo del número de Prandtl (Pr):

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{1,6E-5 \text{ m}^2 / \text{s}}{2,0E-5 \text{ m}^2 / \text{s}} = 0,792 \quad (\text{B.7})$$

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por conducción (hc):

$$hc = c * (\text{Re} * d)^m * (\text{Pr})^{1/3} * \frac{k(Tp)}{d} \quad (\text{B.8})$$

$$hc = 0,228 * (1.115)^{0,731} * (0,792)^{1/3} * \frac{2,6E-2}{1,77E-2} = 51,7 \text{ W} / \text{m}^2 . \text{K}$$

- Cálculo del coeficiente global retransferencia de calor:

$$\frac{1}{U_k} = \frac{1}{hc} + \frac{e}{K} \quad (\text{B.9})$$

donde:

hc: Coeficiente de transferencia de calor por convección, ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$).

U_k : Coeficiente de transferencia de calor global, ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$).

e: profundidad útil de la laguna, (1,37 m).

K: conductividad térmica del agua, (0,552 W/m K). *estimada a la temperatura del agua, por el simulador de procesos químicos PRO II.

Sustituyendo y evaluando en la ecuación B.5:

$$U_k = 0,400 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

- Cálculo de la presión de vapor de agua, por la ecuación de Antoine, en el aire a T_G

$$\log(P^V \text{ 22}^\circ \text{ C}) = 8,10765 - \frac{1750,286}{(22,0) + 235} \quad (\text{B.10})$$

$$P^V = 19,82 \text{ mmHg}$$

- Cálculo de la presión parcial del agua en el aire

$$\dot{P} = Hr * P^V = 0,96 * 19,82 = 19,03 \text{ mmHg} \quad (\text{B.11})$$

- Cálculo de la fracción en b.s. de agua en el aire

$$Y = \frac{\dot{P}}{P_T - \dot{P}} = \frac{19,03}{697 - 19,03} * \frac{18}{29} = 0,0174 \quad (\text{B.12})$$

- Cálculo de la fracción en b.s. de agua en la superficie del sistema

$$P^V(T_s) = 19,23 \text{ mmHg}$$

$$Y_s = \frac{P^V}{P_T - P^V} = \frac{19,23}{697 - 19,23} * \frac{18}{29} = 0,0176 \quad (\text{B.13})$$

- Cálculo del calor latente a la temperatura de superficie T_s, (ecuación obtenida a partir de simulaciones en PRO II)

$$\lambda = 2501600 - 2372 * (21,5) = 2450585 \text{ J} / \text{Kg} \quad (\text{B.14})$$

Para simplificar la ecuación B.3 se debe considerar lo siguiente:

- Dado que el periodo de evaluación corresponde a un tiempo en el cual la radiación solar no está presente ni existe otra fuente de radiación que aporte energía al sistema, entonces, el coeficiente de transferencia de calor por radiación es

despreciable frente al coeficiente de transferencia de calor por convección y el segundo término de la derecha de la ecuación B.3 se desprecia.

- El coeficiente de transferencia de calor global es despreciable frente al coeficiente de transferencia de calor por conducción, por lo que la relación $U_k/hc = 7,7 \cdot 10^{-3}$, es despreciable.

Entonces la ecuación B.3 queda como:

$$\frac{(Y_s - Y) \cdot \lambda}{hc / K_y} = (T - T_s) \quad (\text{B.15})$$

Luego si la temperatura supuesta T_s es la correcta, en ambos lados de la ecuación anterior debe obtenerse el mismo resultado, de lo contrario se debe estimar una nueva temperatura T_s , y repetir los cálculos hasta que se cumpla la condición:

$$\frac{(Y_s - Y) \cdot \lambda}{hc / K_y} = \frac{(0,0176 - 0,0174) \cdot 2450585}{950} = 0,5$$
$$(T - T_s) = (295 - 294,5) = 0,5$$

El resultado indica que la temperatura de superficie supuesta es la correcta lo que implica que el coeficiente de transferencia de calor calculado es correcto.

- Cálculo del coeficiente de transferencia de masa

$$K_y = \frac{hc}{hc / K_y} = \frac{51,7}{950} = 0,054 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

- Cálculo de la rapidez constante de evaporación de humedad

$$N_c = K_y \cdot (Y_s - Y) = 0,054 \cdot (0,0176 - 0,0174) = 1,041 \cdot 10^{-5} \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

- Cálculo de la masa transferida o caudal evaporado:

$$Q_e = N_c \cdot \frac{A_{\text{sup}}}{\rho} \cdot 60 \left(\frac{\text{s}}{\text{min}} \right)$$

donde:

Q_e : caudal evaporado por humidificación, (l/min).

As: Área superficial de la laguna, (70,5 m²).

ρ : Densidad del agua, (0,996 Kg/l)

$$Q_e = 1,041 * E - 5 * \frac{70,5}{0,996} * 60 \left(\frac{s}{min} \right) = 4,42 * E - 2 l / min$$

Queda demostrado que la pérdida de agua por evaporación 0,04 l/min, en el periodo de tiempo de 8:00 p.m. a 6:00 a.m., representa menos de 0,5% del caudal afluente 10 l/min, y no afectara el balance que se desea realizar.

B IV. Calculo tipo del balance hídrico para determinar infiltraciones.

Una vez precisado el horario para el cual las variables evaporación y precipitación no perturbarán el sistema, se realizo el monitoreo del caudal de afluente y efluente para la primera carga hidráulica y los resultados se muestran en la tabla B 2.

- El balance hídrico, despreciando los factores evaporación y precipitación, se presenta como:

$$(Q_a - Q_e) = (A_i - P_i) \quad B 16$$

Q_e : Caudal efluente, (l/min).

Q_a : Caudal afluente, (l/min).

A_i : Aporte por Infiltración, (l/min).

P_i : Perdida por infiltración, (l/min).

Sustituyendo los valores y evaluando:

$$(Q_a - Q_e) = 0,0 l / min$$

El resultado demuestra que de existir infiltración y/o percolación en la laguna estas son despresibles respecto al caudal afluente. Por otra parte, es poco probable que ambos fenómenos se presenten simultaneamente y con magnitudes similares, del tal manera que se anule sus efectos sobre el caudal efluente.

Entonces se concluye que la laguna no presenta infiltración.

Tabla B 2. Medición del caudal afluente y efluente de la laguna facultativa para la carga hidráulica 2,0 MLD/ ha.

Hora 6:00 a.m.	Fecha de Muestreo: 01/06/2006				
Afluente			Efluente		
Volumen (ml)	Tiempo (s)	Caudal (l/min)	Volumen (ml)	Tiempo (s)	Caudal (l/min)
505	2,95	10	600	3,17	11
510	3,22	10	610	3,24	11
495	3,25	9	640	3,85	10
480	2,96	10	590	3,51	10
500	2,89	10	620	3,64	10
505	3,2	9	610	3,58	10
505	3,12	10	610	3,49	10
510	3,15	10	600	3,58	10
500	3,01	10	590	3,79	9
Promedio		10	Promedio		10

B V. Cálculo tipo del flujo de precipitación y evaporación.

Se consideró para cada caso los milímetros de agua evaporados o presipitados acumulados durante el tiempo de retención del sistema luego se realizó la conversión a volumen de líquido y el resultado se dividió entre el tiempo de estudio. A continuación se muestra el procedimiento:

La cantidad acumulada de evaporación promedio entre los días 25/05/06 y 01/06/06/ fue de 4,7 (mm/d). Mientras que la cantidad presipitada para el mismo periodo fue de 0,15 (mm/d). Entonces el flujo de estas variables se calcula como:

$$Q_i = \bar{X} \text{ (mm/d)} * 10^{-3} \frac{m}{mm} * 70,5m^2 * \frac{1000l}{1m^3} * \frac{1d}{1440 \text{ min}} = \bar{X} \text{ (mm/d)} * 4,9 * 10^{-2} \text{ B 17.}$$

donde:

\bar{X} : Evaporación o presipitación promedio para el tiempo de retención en estudio, (mm/d).

sustituyendo y calculando:

$$\bar{E} = 4,7 * 4,9 * 10^{-2} = 0,23 \text{ l/min}$$

$$\bar{P} = 0,15 * 4,9 * 10^{-2} = 0,01 \text{ l/min}$$

donde:

\bar{P} : Presipitación promedio para el tiempo de retención en estudio, (l/min).

\bar{E} : Evaporación promedio para el tiempo de retención en estudio, (l/min).

B VI Cálculo tipo del balance hídrico para el tiempo de retención del sistema.

En el balance hídrico se consideró la evaporación y precipitación promedio para el tiempo de retención de la carga hidráulica en particular. Ya se demostró que la laguna no presenta infiltración, entonces la ecuación simplificada es:

$$Q_e = Q_a + \bar{P} - \bar{E} \quad \text{B 18.}$$

donde:

Q_e : Caudal efluente, (l/min).

Q_a : Caudal afluente, (l/min).

\bar{P} : Presipitación promedio, (l/min).

\bar{E} : Evaporación promedio, (l/min).

Considerando los datos de la carga hidráulica 2,0 MLD/ha, que corresponden a los ensayos entre las fechas 25/05/06 al 01/06/06: caudal afluente, 10 l/min; presipitación promedio, 0,01 l/min; evaporación promedio, 0,23 l/min. Se tiene que:

el porcentaje de pérdida del caudal afluente se estima como:

$$Q_e = 10,0 + 0,01 - 0,23 = 9,8 \text{ l/min}$$

el porcentaje de pérdida del caudal afluente se estima como:

$$\%PA = \left(\frac{\text{Afluente (l/min)} - \text{Efluente (l/min)}}{\text{Afluente (l/min)}} \right) * 100\% \quad \text{B 19.}$$

sustituyendo y calculando:

$$\%PA = \left(\frac{10,0 - 9,8}{10,0} \right) * 100\% = 2,2\%$$

De igual forma se obtienen el balance para los ensayos posteriores, a continuación de presentan los resultados:

Tabla B 3. Balance hídrico para el tiempo de retención del sistema. Carga hidráulica 2,0 MLD/ha.

Fecha de Análisis	Caudal Afluyente (l/min)	Precipitación Promedio (l/min)	Evaporación Promedio (l/min)	Caudal Efluyente (l/min)	Perdida de Caudal Afluyente (%)
Del 25/05/06 al 01/06/06	10,0	0,01	0,23	9,8	2,2
Del 01/06/06 al 08/06/06	10,0	0,17	0,24	9,9	0,8
Del 08/06/06 al 15/06/06	10,0	0,05	0,27	9,8	2,2

Tabla B 4. Balance hídrico para el tiempo de retención del sistema. Carga hidráulica 4,5 MLD/ha.

Fecha de Análisis	Caudal Afluyente (l/min)	Precipitación Promedio (l/min)	Evaporación Promedio (l/min)	Caudal Efluyente (l/min)	Perdida de Caudal Afluyente (%)
Del 08/08/06 al 15/08/06	22,0	0,14	0,23	21,9	0,4
Del 15/08/06 al 17/08/06	22,0	0,30	0,19	22,1	-0,5*
Del 17/08/06 al 19/08/06	22,0	0,34	0,05	22,3	-1,3*

* No hubo pérdida sino aporte

Tabla B 5. Balance hídrico para el tiempo de retención del sistema. Carga hidráulica 6,5 MLD/ha.

Fecha de Análisis	Caudal Afluyente (l/min)	Precipitación Promedio (l/min)	Evaporación Promedio (l/min)	Caudal Efluyente (l/min)	Perdida de Caudal Afluyente (%)
Del 05/09/06 al 06/09/06	32,0	0,07	0,15	31,9	0,3
Del 06/09/06 al 07/09/06	32,0	0,00	0,32	31,7	1,0
Del 07/09/06 al 08/09/06	32,0	0,00	0,36	31,6	1,1

APÉNDICE C

C I. Velocidades de flujo dentro de la laguna.

- Cálculo de la velocidad de la masa de agua en la laguna para la primera carga hidráulica (2,0 MLD/ha):

$$\text{Sección transversal de la Laguna: } A_{TL} = \frac{(B + b) * h}{2} \quad \text{C 1.}$$

donde:

B: Longitud en la superficial, (m).

b: Longitud en el fondo, (m).

h: Nivel de líquido, (m)

A_{TL}: Área de la sección transversal de la laguna, (m²).

$$A_{TL} = \frac{(4,75 + 4,0) * 1,37}{2} = 6 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad promedio del flujo: } V_p = \frac{Q}{A_{TL}} \quad \text{C 2.}$$

donde:

V_p: velocidad promedio del flujo en la laguna, (m/h).

Q_e: Caudal afluente, (m³/h).

A_{TL}: Área de la sección transversal de la laguna, (m²).

$$V_p = \frac{0,6}{6,0} = 0,102 \text{ m / h}$$

$$\text{Velocidad real del flujo: } V_r = \frac{L}{tm} \quad \text{C 3}$$

donde:

V_r: velocidad real del flujo en la laguna, (m/h).

L: Longitud de la laguna, (m).

tm: tiempo de retención medio, (h).

$$Vr = \frac{15,3}{130} = 0,118 \text{ m/h}$$

- Cálculo de la velocidad del afluyente en la laguna:

Sección transversal del tubo de alimentación: $A_t = \frac{\pi}{4}(d)^2$ C 4

donde:

A_t : Área de la sección transversal de la tubería de alimentación a la laguna, (m²).

d: Diámetro interno de tubería 1", (m)

$$A_t = \frac{\pi}{4}(0,0254)^2 = 5,07 * E - 4 \text{ m}^2$$

Velocidad del afluyente: $Va = \frac{Q_e / 3}{A_{TL}}$ C 5.

donde:

Va : velocidad promedio del flujo en la laguna, (m/h).

Q_e : Caudal afluyente, (m³/h).

A_t : Área de la sección transversal de la tubería, (m²).

$$Va = \frac{(0,6/3)}{5,07 * E - 4} = 394 \text{ m/h}$$

De acuerdo a los cálculos la velocidad del afluyente es $2,7*10^3$ veces más rápida que la masa de agua dentro de la laguna.

A continuación se muestra una tabla resumen de los cálculos de velocidad realizados para las tres cargas hidráulicas de operación.

Tabla C.1. Razón de velocidades entre el afluente y la masa de agua en la laguna para las diferentes cargas hidráulicas de operación del sistema.

Carga Hidráulica (MLD/ ha)	Caudal (m ³ /h)	Tiempo de Retención Medio (h)	Velocidad del Afluente Va (m/h)	Velocidad de la Masa de Agua Vr (m/h)	Razón de Velocidades (Va/Vr)
2,0	0,6	130	394	0,118	$3,4 \cdot 10^3$
4,5	1,3	48	855	0,319	$2,7 \cdot 10^3$
6,5	1,9	34	1249	0,450	$2,8 \cdot 10^3$

APÉNDICE D

D I. Resultados del estudio hidráulico para el muestreo discreto

La distribución espacial de la concentración de trazador se expresan en ppb (mg trazador / m³ de agua) y se presenta de forma tabulada en perfiles longitudinales.

Para facilitar el análisis de los datos se le asignó color a las diferentes concentraciones en los perfiles, estableciendo el siguiente criterio: altamente concentrado color rojo, peso asignado >100%; concentrado color fucsia, peso asignado (45-100)%; medianamente concentrado color rosado, peso asignado(10-44)% y bajamente concentrado color blanco, peso asignado (0-9)%. Los colores seleccionados son semejantes a los observados durante el muestreo.

El peso en porcentaje asociado a cada grupo de concentración se establece de acuerdo a la siguiente relación: 0,0 ppb representa 0,0% y el máximo valor de concentración del perfil menor a 1000 ppb corresponde a 100%.

D I.1. Primera Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.

Inyección 22/06/2006 a las 12:00 p.m. concentración de trazador (138 ppb)

1. Resultados del primer muestreo correspondiente a un tiempo entre de 30 min. después de la inyección del trazador:

Nota: Los resultados aquí presentados pueden ser utilizados para representar otros perfiles, como el perfil transversal del fluido, en caso de que la parte interesada así lo deseé.

Perfiles Longitudinales:

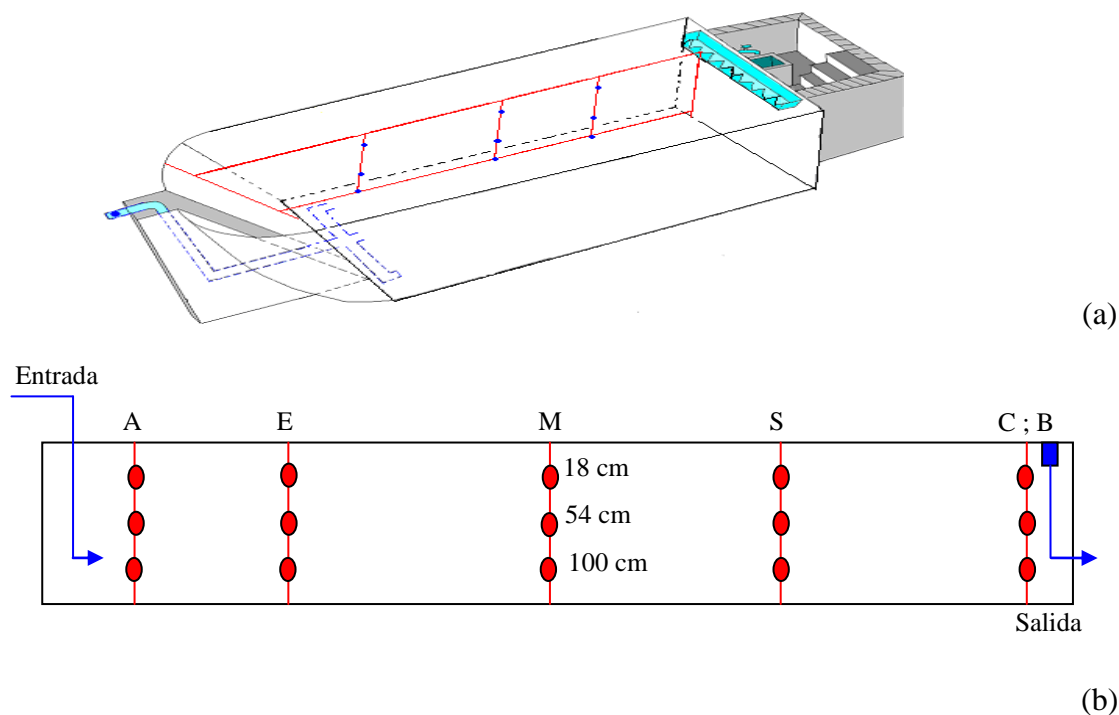


Figura D 2. (a) Representación gráfica del perfil longitudinal izquierdo de la laguna en sentido entrada-salida. (b) Esquema longitudinal de los puntos que permiten la descripción y análisis del sistema.

Tabla D 1. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E3	M3	S3	C2
18	5	6	5	18	47
54	54	45	125	274	266
100	>1000	10	37	32	16

Tabla D 2. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	5	1	4	2	34	57
54	54	1	66	24	255	326
100	>1000	1	41	2	57	75

Tabla D 3. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E1	M1	S1	C1
18	5	3	6	9	78
54	54	13	130	170	105
100	>1000	3	25	23	3

- Resultados del segundo muestreo correspondiente a un tiempo de 5 horas después de la inyección del trazador:

Perfiles Longitudinales:

Tabla D 4. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E3	M3	S3	C2
18	31	20	26	21	27
54	55	182	165	194	208
100	413	92	39	34	25

Tabla D 5. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	31	21	21	15	27	27
54	55	164	135	143	182	239
100	413	104	23	58	92	63

Tabla D 6. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E1	M1	S1	C1
18	31	30	14	16	21
54	55	184	145	106	160
100	413	181	75	61	16

- Resultados del tercer muestreo correspondiente a un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador:

Perfiles Longitudinales:

Tabla D 7. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E3	M3	S3	C2
18	172	162	159	162	159
54	163	161	162	162	159
100	161	164	165	157	169

Tabla D 8 Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	172	156	163	164	165	161
54	163	163	166	164	168	167
100	161	167	161	156	170	153

Tabla D 9. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E1	M1	S1	C1
18	172	162	173	169	170
54	163	159	167	166	170
100	161	163	164	190	191

D I.2. Segunda Carga Hidráulica 4,5 MLD/ha.

Inyección 28/07/2006 a las 12:00 p.m. concentración de trazador (571 ppb)

1. Resultados del primer muestreo correspondiente a un tiempo entre de 30 min. después de la inyección del trazador:

Perfiles Longitudinales:

Tabla D 10. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E3	M3	S3	C2
18	322	66	109	56	96
54	850	500	623	596	889
100	>1000	224	598	>1000	520

Tabla D 11. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	322	78	117	93	96	114
54	850	782	650	607	878	737
100	>1000	>1000	730	>1000	129	347

Tabla D 12. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E1	M1	S1	C1
18	322	57	104	95	90
54	850	974	808	>1000	>1000
100	>1000	>1000	147	825	638

2. Resultados del tercer muestreo correspondiente a un tiempo de 5 horas después de la inyección del trazador:

Perfiles longitudinales:

Tabla D 13. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E3	M3	S3	C2	
18	406	397	412	356	279	
54	882	906	837	864	866	
100	958	>1000	>1000	854	438	

Tabla D 14. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (PPB) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	406	424	432	444	363	375
54	882	904	883	764	873	875
100	958	>1000	>1000	901	408	512

Tabla D 15. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E1	M1	S1	C1	
18	406	364	415	341	274	
54	882	906	932	804	877	
100	958	>1000	794	959	523	

3. Resultados del tercer muestreo correspondiente a un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador:

Perfiles Longitudinales:

Tabla D 16. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E3	M3	S3	C2
18	705	694	705	724	716
54	709	710	722	701	723
100	757	730	718	705	745

Tabla D 17. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	705	689	702	734	714	738
54	709	707	706	727	692	716
100	757	720	733	740	727	726

Tabla D 18. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E1	M1	S1	C1
18	705	681	703	727	717
54	709	709	710	730	723
100	757	723	709	722	733

D I.3. Tercera Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha.

Inyección 29/08/2006 a las 12:00 p.m. concentración de trazador (906 ppb)

1. Resultados del primer muestreo correspondiente a un tiempo entre de 30 min. después de la inyección del trazador:

Perfiles Longitudinales:

Tabla D 19. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 30 min. después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E3	M3	S3	C2
18	33,4	11,1	73,7	851	35,6
54	116	8,87	>1000	>1000	>1000
100	381	14	>1000	322	699

Tabla D 20. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 30min. después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	33,4	160	224	476	617	311
54	116	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
100	381	572	>1000	276	912	>1000

Tabla D 21. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 30min después de la inyección.

Profundidad (cm)	Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
	A	E1	M1	S1	C1
18	33,4	205	192	133	8,38
54	116	>1000	>1000	852	9,74
100	381	>1000	>100	500	7,5

2. Resultados del tercer muestreo correspondiente a un tiempo de 5 horas después de la inyección del trazador:

Perfiles Longitudinales:

Tabla D 22. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E3	M3	S3	C2	
18	>1000	685	505	402	311	
54	>1000	>1000	>1000	944	>1000	
100	>1000	>1000	>1000	>1000	704	

Tabla D 23. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E2	M2	S2	B1	B2
18	>1000	548	475	353	805	334
54	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
100	>1000	>1000	>1000	>1000	422	>1000

Tabla D 24. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 5 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E1	M1	S1	C1	
18	>1000	465	446	393	365	
54	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	
100	>1000	>1000	>1000	>1000	291	

3. Resultados del tercer muestreo correspondiente a un tiempo de 24 horas después de la inyección del trazador:

Perfiles Longitudinales:

Tabla D 25. Perfil longitudinal izquierdo dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E3	M3	S3	C2	
18	980	990	985	986	987	
54	985	986	989	980	990	
100	993	984	991	995	992	

Tabla D 26. Perfil longitudinal central dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales					
Profundidad (cm)	A	E2	M2	S2	B1	B2	
18	980	981	995	992	984	970	
54	985	990	985	976	987	986	
100	993	984	991	995	984	986	

Tabla D 45. Perfil longitudinal derecho dirección entrada-salida, para un tiempo de 24 horas después de la inyección.

		Concentración del trazador (ppb) en puntos longitudinales				
Profundidad (cm)	A	E1	M1	S1	C1	
18	980	984	991	986	969	
54	985	987	984	989	989	
100	993	978	987	991	944	

D II. Resultados del estudio hidráulico para el muestreo Continuo

D II.1. Primera Carga Hidráulica 2,0 MLD/ha.

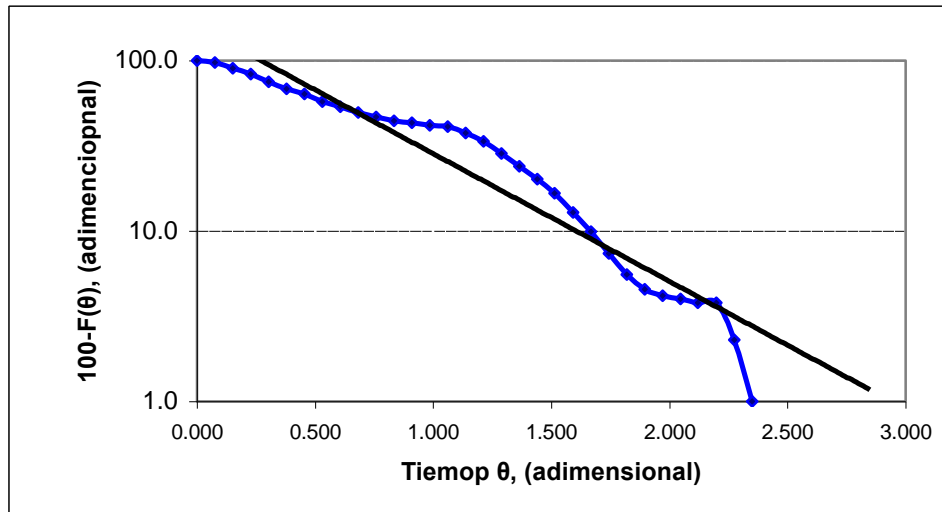


Figura D 4. Curva 1-F para una Carga Hidráulica de 2,0 MLD/ha.

D II.2. Segunda Carga Hidráulica 4,5 MLD/ha.

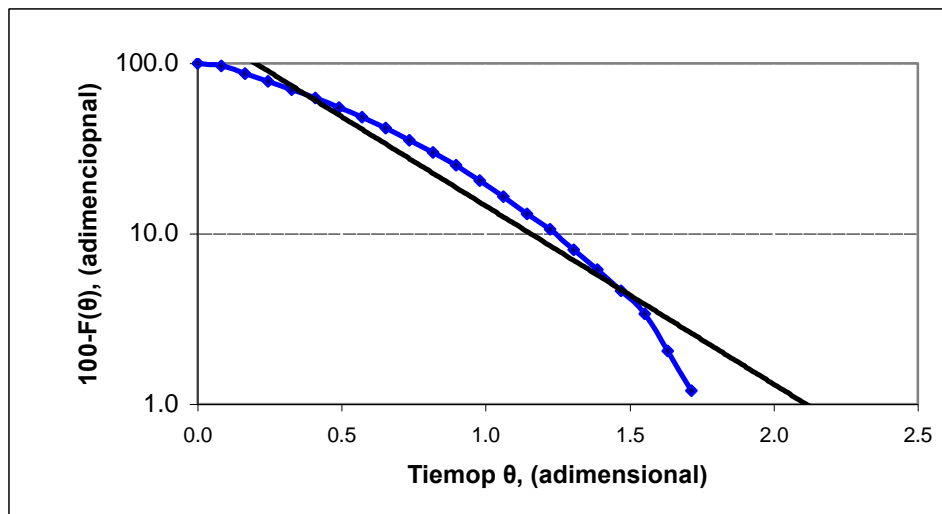


Figura D 5. Curva 1-F para una Carga Hidráulica de 4,5 MLD/ha.

D II.3. Tercera Carga Hidráulica 6,5 MLD/ha.

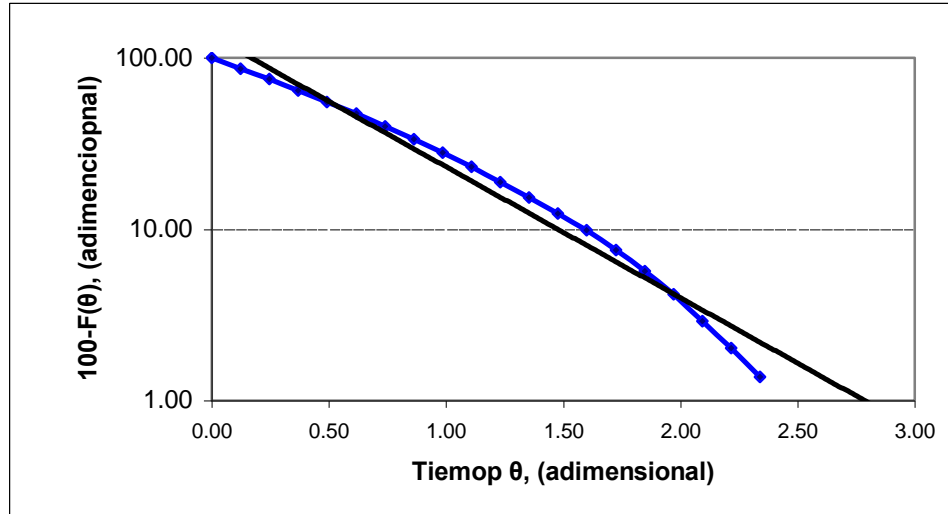


Figura D 6. Curva 1-F para una Carga Hidráulica de 6,5 MLD/ha.

APÉNDICE E

E.I. Parámetros Físico-Químicos In Situ de la laguna facultativa. Antes de la estabilidad de la primera carga de operación.

Tabla E 1. Parámetros Físico-Químicos de la Laguna Facultativa P.E.T.A. 30/03/2006

Marzo 30 de 2006 Hora: 12:00 PM		Parámetros		
		Temperatura (°C)	pH	Oxígeno Disuelto (mg/l)
Estrato Superior (18 cm)	1-18	29	8,17	> 15
	2-18	28	8,14	> 15
	3-18	26	8,44	>15
Estrato Medio (54 cm)	1-54	27	7,42	0,2
	2-54	26	7,30	0,2
	3-54	25	7,32	0,4
Estrato Inferior (100 cm)	1-100	27	7,32	< 0,2
	2-100	26	7,31	< 0,2
	3-100	25	7,30	< 0,2

Tabla E 2. Perfil de Temperaturas de la Laguna Facultativa P.E.T.A. 30/04/2006

Abril 30 de 2006 Hora: 12:00 PM		Parámetro
		Temperatura (°C)
Estrato Superior (18 cm)	1-18	29
	2-18	29
	3-18	29
Estrato Medio (54 cm)	1-54	26
	2-54	26
	3-54	27
Estrato Inferior (100 cm)	1-100	26
	2-100	26
	3-100	26

E.II.- Resultados Físico-químicos “in situ” a lo largo y profundo de la laguna.

E.II.1.- Primera carga operada 231 Kg DBO/ha.d (2,0 MLD/ha).

Tabla N° E.3.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d.(25/05/2006 8:00a.m)

Hora: 8 a.m. Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	26	7,9	0,4	751	288
Pto E2 a 18 cm	24	7,8	0,4	585	228
Pto E2 a 54 cm	25	7,7	0,4	582	240
Pto E2 a 100cm	25	7,8	0,4	579	224
pto M2 a 18 cm	24	7,9	0,4	582	236
pto M2 a 54 cm	25	7,8	0,4	581	232
pto M2 a 100cm	25	7,8	0,4	577	236
Pto S2 a 18 cm	25	7,9	0,4	580	232
Pto S2 a 54 cm	25	7,8	0,4	581	240
Pto S2 a 100cm	25	7,8	0,4	581	240
Pto salida	25	8,0	1,8	578	232

Tabla N° E.3.b.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivida d (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	27	7,4	0,6	727	212
Pto E2 a 18 cm	28	9,0	15	551	204
Pto E2 a 54 cm	25	7,6	0,6	611	216
Pto E2 a 100cm	25	7,6	0,6	609	224
pto M2 a 18 cm	28	8,6	15	566	204
pto M2 a 54 cm	25	7,6	0,6	612	212
pto M2 a 100cm	25	7,5	0,6	605	220
Pto S2 a 18 cm	28	8,6	15	562	200
Pto S2 a 54 cm	25	7,7	0,6	622	212
Pto S2 a 100cm	25	7,9	0,6	607	216
Pto salida	30	9,3	12,4	505	208

Tabla N° E.3.c.-Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivid ad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	27	7,4	0,6	650	228
Pto E2 a 18 cm	26	8,6	8,2	531	208
Pto E2 a 54 cm	25	7,5	0,4	584	236
Pto E2 a 100cm	25	7,5	0,4	581	244
pto M2 a 18 cm	26	8,5	7,0	584	212
pto M2 a 54 cm	25	7,5	0,4	581	244
pto M2 a 100cm	25	7,5	0,4	577	248
Pto S2 a 18 cm	26	8,8	11,2	542	208
Pto S2 a 54 cm	25	7,7	0,4	585	240
Pto S2 a 100cm	25	7,6	0,4	582	240
Pto salida	26	9,0	7,8	504	240

Tabla N° E.3.d.-Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto E2 a 18 cm	24	7,48	0,4	572	236
Pto E2 a 54 cm	24,5	7,52	0,4	572	240
Pto E2 a 100cm	25	7,58	0,4	573	240
pto M2 a 18 cm	24	7,5	0,4	571	240
pto M2 a 54 cm	24,5	7,57	0,4	571	240
pto M2 a 100cm	25	7,51	0,4	576	240
Pto S2 a 18 cm	24	7,54	0,4	567	240
Pto S2 a 54 cm	24,5	7,49	0,4	566	240
Pto S2 a 100cm	25	7,6	0,4	565	240

Tabla N° E.3.e.-Condiciones meteorológicas para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (25/05/2006)

Muestreo 1	
Fecha de captación 25/05/2006	
Sentido del viento	este/oeste
Velocidad promedio (km/d)	2,94
Temperatura actual °C	23,8
Radiación solar (cal/cm ² *d)	249,4
Humedad (%)	84,6
Presión (mmHg)	695

Tabla N° E.4.a.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 8:00a.m) (Continuación)

Hora: 8 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	27	8,0	0,4	716	244
Pto E2 a 18 cm	25	7,9	0,4	602	240
Pto E2 a 54 cm	25	7,8	0,4	597	236
Pto E2 a 100cm	25	7,9	0,4	597	232
pto M2 a 18 cm	25	8,1	0,4	600	240
pto M2 a 54 cm	25	8,0	0,4	600	240
pto M2 a 100cm	25	8,0	0,4	598	240
Pto S2 a 18 cm	25	8,3	0,4	602	244
Pto S2 a 54 cm	25	8,0	0,4	599	240
Pto S2 a 100cm	25	8,0	0,4	601	240
Pto salida	25	8,3	2,0	607	240

Tabla N° E.4.b.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora: 2 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	27	7,3	0,4	693	200
Pto E2 a 18 cm	30	9,2	15	536	216
Pto E2 a 54 cm	27	7,8	0,6	612	228
Pto E2 a 100cm	25	7,8	0,6	609	224
pto M2 a 18 cm	30	9,3	15	550	224
pto M2 a 54 cm	27	7,8	0,6	618	232
pto M2 a 100cm	25	7,6	0,4	617	224
Pto S2 a 18 cm	30	9,1	15	552	212
Pto S2 a 54 cm	26	7,9	0,4	625	228
Pto S2 a 100cm	25	7,7	0,4	630	228
Pto salida	31	9,3	14	538	200

Tabla N° E.4.c.- Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	27	7,3	0,6	653	204
Pto E2 a 18 cm	27	8,7	10,2	532	204
Pto E2 a 54 cm	26	7,3	0,5	599	232
Pto E2 a 100cm	25	7,3	0,4	590	244
pto M2 a 18 cm	27	8,4	6,6	555	208
pto M2 a 54 cm	26	7,2	0,4	603	224
pto M2 a 100cm	25	7,3	0,4	598	236
Pto S2 a 18 cm	27	8,8	10,2	533	208
Pto S2 a 54 cm	26	7,3	0,4	601	228
Pto S2 a 100cm	25	7,2	0,4	596	236
Pto salida	26	8,9	9,0	516	208

Tabla N° E.4.d Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	27	7,4	0,4	487	172
Pto E2 a 18 cm	25	7,6	0,4	593	236
Pto E2 a 54 cm	25	7,6	0,4	589	236
Pto E2 a 100cm	25	7,6	0,3	586	224
pto M2 a 18 cm	25	7,5	0,3	591	212
pto M2 a 54 cm	25	7,5	0,3	589	224
pto M2 a 100cm	25	7,5	0,3	586	228
Pto S2 a 18 cm	25	7,5	0,3	588	264
Pto S2 a 54 cm	25	7,6	0,3	591	224
Pto S2 a 100cm	25	7,6	0,3	591	224
Pto salida	25	7,8	0,4	588	232

Tabla N° E.4.e Condiciones meteorológicas para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (01/06/2006)

(Continuación)

Muestreo 2	
Fecha de captación 01/06/2006	
Sentido del viento	Noreste/suroeste
Velocidad promedio (km/d)	2,68
Temperatura actual °C	25,1
Radiación solar (cal/cm ² *d)	377,2
Humedad (%)	81,9
Presión (mmHg)	695

Tabla N° E.5.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 8:00a.m) (Continuación)

Hora: 8 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	27	7,7	0,6	710	243
Pto E2 a 18 cm	25	7,6	0,6	583	214
Pto E2 a 54 cm	25	7,5	0,6	583	220
Pto E2 a 100cm	25	7,6	0,6	579	217
pto M2 a 18 cm	25	7,6	0,6	584	220
pto M2 a 54 cm	25	7,5	0,6	578	223
pto M2 a 100cm	25	7,5	0,6	578	220
Pto S2 a 18 cm	25	7,5	0,6	582	220
Pto S2 a 54 cm	25	7,5	0,6	581	217
Pto S2 a 100cm	25	7,6	0,6	579	220
Pto salida	25	7,7	0,6	579	217

Tabla N° E.5.b Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	28	7,3	0,6	757	209
Pto E2 a 18 cm	31	9,3	15	517	200
Pto E2 a 54 cm	27	7,7	0,6	596	211
Pto E2 a 100cm	26	7,4	0,6	593	211
pto M2 a 18 cm	30	9,1	15	527	197
pto M2 a 54 cm	26	7,7	0,6	608	206
pto M2 a 100cm	26	7,4	0,6	610	211
Pto S2 a 18 cm	30	9,1	15	547	203
Pto S2 a 54 cm	26	7,6	0,6	624	214
Pto S2 a 100cm	26	7,3	0,6	620	214
Pto salida	31	9,9	15	549	197

Tabla N° E.5.c Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	26	7,6	0,4	709	243
Pto E2 a 18 cm	28	9,0	12,2	512	206
Pto E2 a 54 cm	27	7,7	0,5	598	220
Pto E2 a 100cm	26	7,8	0,4	592	234
pto M2 a 18 cm	27	8,5	3,2	567	214
pto M2 a 54 cm	27	8,0	0,4	590	229
pto M2 a 100cm	25	7,9	0,4	587	226
Pto S2 a 18 cm	27	9,4	15,0	506	206
Pto S2 a 54 cm	26	7,9	0,4	598	229
Pto S2 a 100cm	25	7,7	0,4	593	234
Pto salida	18	9,5	11,2	487	226

Tabla N° E.5.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	25	7,4	2	514	180
Pto E2 a 18 cm	24	7,4	0,4	589	217
Pto E2 a 54 cm	24	7,5	0,4	588	214
Pto E2 a 100cm	24	7,4	0,4	586	229
pto M2 a 18 cm	24	7,5	0,4	583	206
pto M2 a 54 cm	24	7,4	0,4	582	217
pto M2 a 100cm	24	7,4	0,4	578	214
Pto S2 a 18 cm	24	7,4	0,4	584	217
Pto S2 a 54 cm	24	7,4	0,4	581	217
Pto S2 a 100cm	24	7,2	0,4	589	217
Pto salida	25	7,6	0,4	586	211

Tabla N° E.5.e Condiciones meteorológicas para la carga 231 Kg DBO/ha.d. (08/06/2006) (Continuación)

Muestreo 3	
Fecha de captación 08/06/2006	
Sentido del viento	Noreste/suroeste
Velocidad promedio (km/d)	2,94
Temperatura actual °C	25,0
Radiación solar (cal/cm ² *d)	398,6
Humedad (%)	85,0
Presión (mmHg)	695

E.2.2.-Segunda carga operada 306 Kg DBO/ha.d (4,5 MLD/ha).

Tabla N° E.6.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 8:00a.m)

Hora: 8 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	26	7,5	0,4	494	160
Pto E2 a 18 cm	26	7,4	1,0	566	208
Pto E2 a 54 cm	26	7,4	1,0	551	208
Pto E2 a 100cm	26	7,4	0,8	557	212
pto M2 a 18 cm	26	7,5	0,8	556	216
pto M2 a 54 cm	26	7,5	0,8	551	208
pto M2 a 100cm	26	7,6	0,7	550	208
Pto S2 a 18 cm	26	7,8	1,0	550	212
Pto S2 a 54 cm	26	7,6	0,4	549	212
Pto S2 a 100cm	26	7,6	0,4	554	216
Pto salida	26	7,7	0,4	557	208

Tabla N° E.6.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	29	7,3	1,2	672	204
Pto E2 a 18 cm	30	8,6	15,0	505	224
Pto E2 a 54 cm	28	7,9	3,8	585	212
Pto E2 a 100cm	27,5	8,0	0,6	588	220
pto M2 a 18 cm	29,5	9,3	15,0	523	208
pto M2 a 54 cm	28	8,3	2,2	583	220
pto M2 a 100cm	28	8,1	0,4	585	224
Pto S2 a 18 cm	29,5	9,7	15,0	507	236
Pto S2 a 54 cm	28	8,4	0,4	587	232
Pto S2 a 100cm	27,5	8,5	0,4	574	244
Pto salida	30	9,8	14,8	509	248

Tabla N° E.6.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivi dad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
	Pto entrada	28	*	2,2	577
Pto E2 a 18 cm	27,5	*	1,6	542	*
Pto E2 a 54 cm	27,5	*	0,4	561	*
Pto E2 a 100cm	27,5	*	0,4	564	*
pto M2 a 18 cm	28,5	*	1,0	546	*
pto M2 a 54 cm	28	*	0,4	562	*
pto M2 a 100cm	27	*	0,4	567	*
Pto S2 a 18 cm	28,5	*	2,0	545	*
Pto S2 a 54 cm	28	*	0,4	568	*
Pto S2 a 100cm	27	*	0,4	564	*
Pto salida	27	*	3,9	537	*

*Datos no registrados por problemas técnicos.

Tabla N° E.6.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivid ad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
	Pto entrada	28	*	3,4	454
Pto E2 a 18 cm	27,5	*	0,5	551	*
Pto E2 a 54 cm	27	*	0,4	551	*
Pto E2 a 100cm	27	*	0,4	554	*
pto M2 a 18 cm	27	*	0,4	546	*
pto M2 a 54 cm	27	*	0,4	556	*
pto M2 a 100cm	27	*	0,3	551	*
Pto S2 a 18 cm	27,5	*	0,4	553	*
Pto S2 a 54 cm	27	*	0,4	555	*
Pto S2 a 100cm	27	*	0,4	550	*
Pto salida	27	*	0,4	545	*

*Datos no registrados por problemas técnicos.

Tabla N° E.6.e. Condiciones meteorológicas para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (08/08/2006)

Muestreo 1	
Fecha de captación	08/08/2006
Sentido del viento	este/oeste
Velocidad promedio (km/d)	1,64
Temperatura actual °C	22,6
Radiación solar (cal/cm ² *d)	297,5
Humedad (%)	85,6
Presión (mmHg)	697

Tabla N° E.7.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006 8:00a.m) (Continuación)

Hora: 8 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	28	*	0,8	727	*
Pto E2 a 18 cm	27,5	*	0,6	572	*
Pto E2 a 54 cm	27,5	*	0,5	570	*
Pto E2 a 100cm	27,5	*	0,4	572	*
pto M2 a 18 cm	27,5	*	0,4	569	*
pto M2 a 54 cm	27	*	0,4	567	*
pto M2 a 100cm	26,5	*	0,4	565	*
Pto S2 a 18 cm	27,5	*	2,2	566	*
Pto S2 a 54 cm	27,5	*	0,4	568	*
Pto S2 a 100cm	26,5	*	0,4	573	*
Pto salida	27,5	*	2,7	575	*

*Datos no registrados por problemas técnicos.

Tabla N° E.7.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d.(15/08/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivida d (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	27,5	*	1,8	653	*
Pto E2 a 18 cm	28,5	*	15	525	*
Pto E2 a 54 cm	26	*	0,6	585	*
Pto E2 a 100cm	26	*	0,6	579	*
pto M2 a 18 cm	28	*	15	529	*
pto M2 a 54 cm	26,5	*	0,4	576	*
pto M2 a 100cm	26	*	0,4	566	*
Pto S2 a 18 cm	28,5	*	13,2	538	*
Pto S2 a 54 cm	26,5	*	0,6	580	*
Pto S2 a 100cm	26	*	0,4	573	*
Pto salida	30,5	*	15	511	*

*Datos no registrados por problemas técnicos.

Tabla N° E.7.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivid ad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	26	8,1	1,1	614	220
Pto E2 a 18 cm	27	8,0	1,0	555	204
Pto E2 a 54 cm	26,5	7,7	0,8	571	212
Pto E2 a 100cm	26	7,5	0,7	573	212
pto M2 a 18 cm	27	8,0	0,6	554	208
pto M2 a 54 cm	26,5	7,7	0,6	564	208
pto M2 a 100cm	26	7,5	0,6	574	212
Pto S2 a 18 cm	27	8,0	0,6	550	200
Pto S2 a 54 cm	26,5	7,7	0,5	568	212
Pto S2 a 100cm	26	7,5	0,4	571	220
Pto salida	27	8,5	3,7	536	220

Tabla N° E.7.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	25	7,6	2,2	465	200
Pto E2 a 18 cm	25	7,3	0,8	550	208
Pto E2 a 54 cm	25	7,3	0,8	543	212
Pto E2 a 100cm	25	7,4	0,8	545	216
pto M2 a 18 cm	25	7,3	0,8	555	212
pto M2 a 54 cm	25	7,3	0,6	551	216
pto M2 a 100cm	25	7,2	0,5	554	212
Pto S2 a 18 cm	25	7,3	0,5	556	208
Pto S2 a 54 cm	25	7,3	0,5	556	204
Pto S2 a 100cm	25	7,2	0,4	557	208
Pto salida	25	7,4	0,5	544	212

Tabla N° E.7.e. Condiciones meteorológicas para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (15/08/2006) (Continuación)

Muestreo 2	
Fecha de captación 15/08/2006	
Sentido del viento	Noreste/suroeste
Velocidad promedio (Km/d)	1,12
Temperatura actual °C	25,4
Radiación solar (cal/cm ² *d)	394,1
Humedad (%)	86,0
Presión (mmHg)	695

Tabla N° E.8.a Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 8:00a.m) (Continuación)

Hora: 8 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	27	8,0	0,8	687	252
Pto E2 a 18 cm	25	8,2	0,8	553	212
Pto E2 a 54 cm	25	7,9	0,7	551	220
Pto E2 a 100cm	25	8,1	0,7	551	220
pto M2 a 18 cm	26	8,1	0,7	542	220
pto M2 a 54 cm	25,5	8,1	0,7	548	208
pto M2 a 100cm	25,5	8,0	0,6	548	212
Pto S2 a 18 cm	25,5	8,1	0,7	542	204
Pto S2 a 54 cm	25	8,0	0,6	546	220
Pto S2 a 100cm	25	8,0	0,6	544	212
Pto salida	26	8,0	1,8	540	212

Tabla N° E.8.b Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivida d (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	26	7,6	3,8	611	188
Pto E2 a 18 cm	28	9,0	15,0	514	204
Pto E2 a 54 cm	26	7,7	1,0	575	200
Pto E2 a 100cm	26	7,6	0,8	574	200
pto M2 a 18 cm	28	8,9	15,0	502	196
pto M2 a 54 cm	26,5	7,6	0,8	573	204
pto M2 a 100cm	26,5	7,5	0,6	574	208
Pto S2 a 18 cm	28	8,7	15,0	525	196
Pto S2 a 54 cm	26	7,6	0,6	568	200
Pto S2 a 100cm	26	7,4	0,5	571	208
Pto salida	28	8,7	11,0	512	192

Tabla N° E.8.c Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	25	7,4	2,3	545	184
Pto E2 a 18 cm	25	7,5	0,4	525	204
Pto E2 a 54 cm	25	7,6	0,4	526	208
Pto E2 a 100cm	25	7,5	0,4	523	196
pto M2 a 18 cm	25	7,4	0,4	522	200
pto M2 a 54 cm	25	7,4	0,4	527	196
pto M2 a 100cm	25	7,4	0,4	528	196
Pto S2 a 18 cm	25	7,8	0,4	535	200
Pto S2 a 54 cm	25	7,6	0,4	530	204
Pto S2 a 100cm	25	7,4	0,4	528	204
Pto salida	25	7,5	0,4	525	196

Tabla N° E.8.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	25	7,4	2,3	545	184
Pto E2 a 18 cm	25	7,5	0,4	525	204
Pto E2 a 54 cm	25	7,6	0,4	526	208
Pto E2 a 100cm	25	7,5	0,4	523	196
pto M2 a 18 cm	25	7,4	0,4	522	200
pto M2 a 54 cm	25	7,4	0,4	527	196
pto M2 a 100cm	25	7,4	0,4	528	196
Pto S2 a 18 cm	25	7,8	0,4	535	200
Pto S2 a 54 cm	25	7,6	0,4	530	204
Pto S2 a 100cm	25	7,4	0,4	528	204
Pto salida	25	7,5	0,4	525	196

Tabla N° E.8.e Condiciones meteorológicas para la carga 306 Kg DBO/ha.d. (17/08/2006)
(Continuación)

Muestreo 3	
Fecha de captación 17/08/2006	
Sentido del viento	Noreste/suroeste
Velocidad promedio (Km/d)	0,78
Temperatura actual °C	22,1
Radiación solar (cal/cm ² *d)	163,3
Humedad (%)	89,4
Presión (mmHg)	695

E.2.3.- Tercera carga operada 569 Kg DBO/ ha.d (6,5 MLD/ha)

Tabla N° E.9.a Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 8:00a.m)

Hora: 8 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	26	7,7	0,4	723	264
Pto E2 a 18 cm	26	7,2	0,4	574	208
Pto E2 a 54 cm	25	7,5	0,4	577	212
Pto E2 a 100cm	25	7,5	0,4	574	212
pto M2 a 18 cm	26	7,6	0,4	574	212
pto M2 a 54 cm	25	7,4	0,4	574	212
pto M2 a 100cm	25	7,5	0,4	573	212
Pto S2 a 18 cm	25	7,5	0,4	568	212
Pto S2 a 54 cm	25	7,4	0,4	573	212
Pto S2 a 100cm	25	7,5	0,4	571	212
Pto salida	25	7,6	0,4	563	208

Tabla N° E.9.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivida d (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	27	7,5	0,8	662	208
Pto E2 a 18 cm	28	8,5	14,7	555	204
Pto E2 a 54 cm	26,9	7,6	0,6	592	208
Pto E2 a 100cm	25	7,3	0,6	597	212
pto M2 a 18 cm	28	8,2	8,2	577	204
pto M2 a 54 cm	26	7,5	0,6	600	212
pto M2 a 100cm	25	7,2	0,6	593	212
Pto S2 a 18 cm	28	8,3	11,2	563	200
Pto S2 a 54 cm	26,5	7,5	0,6	601	212
Pto S2 a 100cm	26	7,3	0,6	597	208
Pto salida	30	8,9	15	526	208

Tabla N° E.9.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivid ad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	26	7,5	0,4	551	180
Pto E2 a 18 cm	26	7,6	0,8	572	200
Pto E2 a 54 cm	26	7,6	0,8	578	204
Pto E2 a 100cm	26	7,6	0,7	582	200
pto M2 a 18 cm	26	7,5	0,6	579	204
pto M2 a 54 cm	26	7,5	0,4	580	212
pto M2 a 100cm	26	7,7	0,4	587	204
Pto S2 a 18 cm	26	7,6	0,4	579	208
Pto S2 a 54 cm	26	7,6	0,4	582	200
Pto S2 a 100cm	26	7,4	0,4	591	204
Pto salida	25,5	7,7	0,4	570	200

Tabla N° E.9.d Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	24,5	7,6	1,2	464	164
Pto E2 a 18 cm	25	7,4	0,2	575	208
Pto E2 a 54 cm	25	7,4	0,2	576	208
Pto E2 a 100cm	25	7,4	0,2	574	208
pto M2 a 18 cm	25	7,3	0,2	570	208
pto M2 a 54 cm	25	7,4	0,2	571	208
pto M2 a 100cm	25	7,4	0,2	573	208
Pto S2 a 18 cm	25	7,4	0,2	571	204
Pto S2 a 54 cm	25	7,4	0,2	575	208
Pto S2 a 100cm	25	7,4	0,2	567	208
Pto salida	25	7,5	0,2	570	204

Tabla N° E.9.e. Condiciones meteorológicas para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (05/09/2006) (Continuación)

Muestreo 1	
Fecha de captación 05/09/2006	
Sentido del viento	este/oeste
Velocidad promedio (Km/d)	0,78
Temperatura actual °C	23,5
Radiación solar (cal/cm ² *d)	278,7
Humedad (%)	83,7
Presión (mmHg)	693

Tabla N° E.10.a. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 8:00a.m) (Continuación)

Hora: 8 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	25,5	8,1	0,2	658	248
Pto E2 a 18 cm	25	7,5	0,2	551	212
Pto E2 a 54 cm	25	7,5	0,2	548	216
Pto E2 a 100cm	25	7,3	0,2	545	212
pto M2 a 18 cm	25	7,3	0,2	545	216
pto M2 a 54 cm	25	7,4	0,2	549	212
pto M2 a 100cm	25	7,5	0,2	542	208
Pto S2 a 18 cm	25	7,4	0,2	547	216
Pto S2 a 54 cm	25	7,6	0,2	538	212
Pto S2 a 100cm	25	7,6	0,2	544	212
Pto salida	25	7,6	0,2	533	212

Tabla N° E.10.b. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductivid ad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	26	7,9	0,8	546	208
Pto E2 a 18 cm	26,5	7,6	0,8	542	212
Pto E2 a 54 cm	25,5	7,8	0,6	550	204
Pto E2 a 100cm	25,5	7,9	0,6	555	208
pto M2 a 18 cm	26	7,5	0,6	552	216
pto M2 a 54 cm	25,5	7,5	0,4	556	212
pto M2 a 100cm	25,5	7,5	0,2	557	216
Pto S2 a 18 cm	26	7,8	0,8	553	212
Pto S2 a 54 cm	25,5	7,5	0,4	557	216
Pto S2 a 100cm	25,5	7,4	0,2	549	212
Pto salida	26	7,8	0,8	635	204

Tabla N° E.10.c. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μ S)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	25,5	8,0	1,0	622	200
Pto E2 a 18 cm	25	7,5	0,6	590	212
Pto E2 a 54 cm	25	7,4	0,4	592	220
Pto E2 a 100cm	25	7,4	0,4	592	216
pto M2 a 18 cm	25	7,3	0,6	592	208
pto M2 a 54 cm	25	7,5	0,2	592	216
pto M2 a 100cm	25	7,5	0,2	593	212
Pto S2 a 18 cm	25	7,4	0,2	592	220
Pto S2 a 54 cm	25	7,6	0,2	595	208
Pto S2 a 100cm	25	7,4	0,2	592	216
Pto salida	25	7,6	0,2	587	212

Tabla N° E.10.d. Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μ S)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	25	7,9	0,4	472	160
Pto E2 a 18 cm	24,5	7,3	1	582	212
Pto E2 a 54 cm	24,5	7,4	1	584	212
Pto E2 a 100cm	24	7,4	1	587	220
pto M2 a 18 cm	24	7,4	0,6	581	216
pto M2 a 54 cm	24	7,4	0,4	583	212
pto M2 a 100cm	24	7,4	0,3	581	216
Pto S2 a 18 cm	24	7,5	0,2	582	216
Pto S2 a 54 cm	24	7,7	0,2	585	208
Pto S2 a 100cm	24	7,5	0,2	586	216
Pto salida	24	7,4	0,4	582	212

Tabla N° E.10.e. Condiciones meteorológicas para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (06/09/2006) (Continuación)

Muestreo 2	
Fecha de captación 06/09/2006	
Sentido del viento	este/oeste
Velocidad promedio (Km/d)	0,52
Temperatura actual °C	22,1
Radiación solar (cal/cm ² *d)	164,9
Humedad (%)	81,2
Presión (mmHg)	694

Tabla N° E.11.a Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 8:00a.m) (Continuación)

Hora:8:00 a.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
	Pto entrada	25,5	7,6	0,8	774
Pto E2 a 18 cm	25	7,2	0,8	599	204
Pto E2 a 54 cm	25	6,9	0,6	604	204
Pto E2 a 100cm	25	7,0	0,6	600	204
pto M2 a 18 cm	25	7,1	0,6	602	204
pto M2 a 54 cm	25	6,9	0,4	609	200
pto M2 a 100cm	25	6,9	0,4	599	204
Pto S2 a 18 cm	25	7,1	0,4	607	200
Pto S2 a 54 cm	25	7,0	0,4	609	204
Pto S2 a 100cm	25	7,0	0,4	599	200
Pto salida	25	7,1	0,8	588	208

Tabla N° E.11.b Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 2:00p.m) (Continuación)

Hora:2:00 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	27	7,2	0,8	653	188
Pto E2 a 18 cm	28,5	7,9	0,6	617	212
Pto E2 a 54 cm	26	7,5	0,4	619	216
Pto E2 a 100cm	25	7,3	0,4	622	220
pto M2 a 18 cm	28,5	7,9	5,2	614	216
pto M2 a 54 cm	26	7,6	0,8	622	212
pto M2 a 100cm	25	7,2	0,4	619	220
Pto S2 a 18 cm	28,5	7,7	1,2	612	212
Pto S2 a 54 cm	26	7,4	0,6	615	212
Pto S2 a 100cm	25,5	7,2	0,6	622	216
Pto salida	31	8,2	8,1	597	204

Tabla N° E.11.c Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 8:00p.m) (Continuación)

Hora: 8 p.m.					
Parámetros Puntos	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (μS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Pto entrada	25,5	7,2	1,2	610	192
Pto E2 a 18 cm	26	7,3	0,8	607	204
Pto E2 a 54 cm	26	7,2	0,8	605	204
Pto E2 a 100cm	25	7,0	0,7	615	208
pto M2 a 18 cm	26	7,2	0,6	601	204
pto M2 a 54 cm	26	7,2	0,4	602	204
pto M2 a 100cm	25,5	7,0	0,4	611	208
Pto S2 a 18 cm	26	7,2	0,7	599	200
Pto S2 a 54 cm	26	7,2	0,6	604	200
Pto S2 a 100cm	25	7,1	0,6	613	204
Pto salida	26	7,3	1,0	598	208

Tabla N° E.11.d Parámetros Físico-Químico para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006 2:00a.m) (Continuación)

Hora: 2 a.m.					
Parámetros	T° (°C)	pH	O.D (mg/l)	Conductividad (µS)	Alcalinidad total en CaCO ₃ (mg/l)
Puntos					
Pto entrada	25,5	7,6	1,6	446	204
Pto E2 a 18 cm	25	7,3	0,4	575	208
Pto E2 a 54 cm	25	6,9	0,2	566	204
Pto E2 a 100cm	25	6,9	0,2	572	208
pto M2 a 18 cm	25	7,1	0,4	566	204
pto M2 a 54 cm	25	6,9	0,4	567	204
pto M2 a 100cm	25	7	0,4	572	204
Pto S2 a 18 cm	25	7	0,4	575	208
Pto S2 a 54 cm	25	7	0,2	581	212
Pto S2 a 100cm	25	7,1	0,2	571	208
Pto salida	25	7,2	0,4	589	212

Tabla N° E.11.e Condiciones meteorológicas para la carga 569 Kg DBO/ha.d. (07/09/2006) (Continuación)

Muestreo 3	
Fecha de captación 07/09/2006	
Sentido del viento	Noreste/Suroeste
Velocidad promedio (Km/d)	0,86
Temperatura actual °C	24,3
Radiación solar (cal/cm ² *d)	350
Humedad (%)	74,4
Presión (mmHg)	692

E.III. Parámetros físico-químicos obtenidos en el laboratorio

E.III.1.- Primera carga operada 233 Kg DBO/ ha.d (2,0 MLD/ha)

Tabla N° E.12. Condiciones de estabilidad para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)

Fecha de la Captación	Sitio de la Captación	% de Remoción DBO(mg/l)
05/04/2006	entrada laguna facultativa	
	salida laguna facultativa	66
	salida soluble laguna facultativa	86
28/04/2006	entrada laguna facultativa	
	salida laguna facultativa	72
	salida soluble laguna facultativa	**
12/05/2006	entrada laguna facultativa	
	salida laguna facultativa	71
	salida soluble laguna facultativa	90
19/05/2006	entrada laguna facultativa	
	salida laguna facultativa	66
	salida soluble laguna facultativa	92

** Porcentaje de agotamiento inferior al 20%

Tabla N° E.13 Porcentaje de remoción en términos de DBO para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)

Sitio de la captación	DBO (mg/l) muestreo				DBO (mg/l) promedio	% Remoción	desviación estándar
	25/05/2006	01/06/2006	08/06/2006	15/06/2006			
entrada L.F.	96	108	135	106	111		16,7
salida L.F.	51	55	56	50	53	52%	2,94
salida soluble L.F.	12,0	14,0	15,0	16,0	14,3	87%	1,71

Apéndice

Tabla N° E.14 Porcentaje de remoción en términos de DQO para la carga orgánica 233 (Kg DBO/ ha.d)

Sitio de la captación	DQO (mg/l) muestreo				DQO (mg/l) promedio	%Remoción	desviación estándar
	25/05/2006	01/06/2006	08/06/2006	15/06/2006			
entrada L.F.	176	189	189	206	190		12,3
salida L.F.	166	142	142	178	157	17%	18,0
salida soluble L.F.	49	47	38	56	48	75%	7,42

Tabla N° E.15 Sólidos en todas sus formas para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)

Sólidos	Promedio Entrada(mg/l)	Promedio Salida (mg/l)	Desviación Entrada	Desviación Salida
Totales	391	374	10	13
Totales Fijos	338	322	16	18
Totales Volátiles	262	252	10	14
Totales Disueltos	242	231	18	20
Fijos Disueltos	129	122	19	6
Volátiles Disueltos	96	90	34	32
Totales Suspendidos	53	52	7	19
Fijos Suspendidos	20	21	10	16
Volátiles Suspendidos	33	31	16	27
Sedimentables (ml/L)	0,5	0,2	0,4	0,2

Tabla N° E.16 Registro de temperatura para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)

Tiempo (hr)	Temperatura entrada °C	Desviación estándar	Temperatura a salida °C	Desviación estándar
8:00a.m.	26,5	0,6	24,8	0,5
9:00a.m.	26,8	1,0	25,0	0,8
10:00a.m.	26,8	0,5	26,8	1,3
11:00a.m.	27,3	0,5	27,5	1,9
12:00p.m.	26,8	1,3	29,3	1,0
1:00p.m.	27,0	1,4	30,0	0,8
2:00p.m.	27,0	1,4	30,5	1,3
3:00p.m.	27,0	2,0	30,5	1,0
4:00p.m.	27,0	1,4	30,5	1,3
5:00p.m.	26,4	1,3	29,1	1,2
6:00p.m.	26,3	1,5	28,5	1,3
7:00p.m.	26,5	1,7	27,3	1,7
8:00p.m.	26,0	1,4	26,0	1,6
9:00p.m.	26,3	1,5	25,3	1,7
10:00p.m.	26,0	1,4	25,3	1,7
11:00p.m.	25,8	1,3	24,5	1,7
12:00a.m.	24,8	1,3	24,3	1,5
1:00a.m.	25,0	0,8	23,8	1,3
2:00a.m.	25,5	1,3	24,0	1,4
3:00a.m.	25,3	1,0	24,0	1,4
4:00a.m.	25,3	1,0	24,0	1,4
5:00a.m.	25,0	1,4	23,8	1,9
6:00a.m.	24,8	1,5	23,3	1,7
7:00a.m.	25,0	1,8	23,5	1,7

Apéndice

Tabla N° E.17 Porcentaje de remoción del nitrógeno Kjeldahl para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ ha.d)

Respecto a:	Porcentaje de Remoción del Nitrógeno Kjeldahl (mg N / L)			%Remoción Promedio
	(25-01) /05/2006	(01-08) /06/2006	(08-15) /06/2006	
Salida Total	25,23%	27,45%	18,14%	23,61%
Desviación Estándar	7%	16%	23%	
Salida Soluble	49,54%	50,49%	43,14%	47,72%
Desviación Estándar	4%	6%	10%	

Tabla N° E.18 Porcentaje de Remoción del fósforo para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ha.d)

Sitio de la Captación	Fósforo Total Soluble(mg P / l) Muestras				Fósforo Total Soluble(mg P / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	25/05/06	01/06/06	08/06/06	15/06/06			
Entrada L.F.	1,99	2,11	0,92	1,4	1,61	0,55	
Salida L.F.	1,4	1,76	1,58	2,73	1,87	0,59	-

Tabla N° E.19 Porcentaje de Remoción de nitratos para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ha.d)

Sitio de la Captación	Nitratos (mg N / l) Muestras				Nitratos (mg N / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	25/05/06	01/06/06	08/06/06	15/06/06			
Entrada L.F.	5,06	5	6,21	4,27	5,14	0,80	
Salida L.F.	13,49	2,99	10,71	11,26	9,61	4,6	-

Apéndice

Tabla N° E.20 Porcentaje de remoción de nitritos para la carga orgánica 231 (Kg DBO/ha.d)

Sitio de la Captación	Nitritos (mg N / l) Muestras				Nitritos (mg N / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	25/05/06	01/06/06	08/06/06	15/06/06			
Entrada L.F.	67,84	41,89	36,39	43,46	47,40	14,0	
Salida L.F.	0,84	27,74	0,003	0,07	7,16	13,7	85%

E.III.2.-Segunda carga operada 306 Kg DBO/ ha.d (4,5 MLD/ha)

Tabla N° E.21 Condiciones de estabilidad carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)

fecha de la captación	sitio de la captación	% de remoción DBO(mg/l)
27/07/2006	entrada laguna facultativa	--
	salida laguna facultativa	76
	salida soluble laguna facultativa	92
02/08/2006	entrada laguna facultativa	
	salida laguna facultativa	73
	salida soluble laguna facultativa	91
04/08/2006	entrada laguna facultativa	
	salida laguna facultativa	74
	salida soluble laguna facultativa	92

Tabla N° E.22 Porcentaje de remoción en términos de DBO para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)

Sitio de la captación	DBO (mg/l) muestreo				DBO (mg/l) promedio	%Remoción	Desviación estándar
	08/08/06	15/08/06	17/08/06	19/08/06			
entrada L.F.	87	60	48	77	68		17,4
salida L.F.	49	47	42	47	46	32%	2,99
salida soluble L.F.	15,0	14,0	14,0	14,0	14,3	79%	0,50

Apéndice

Tabla N° E.23 Porcentaje de remoción en términos de DQO para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)

Sitio de la captación	DQO (mg/l) muestreo				DQO (mg/l) promedio	%Remoción	desviación estándar
	08/08/06	15/08/06	17/08/06	19/08/06			
entrada L.F.	160	180	140	160	160		16
salida L.F.	120	160	130	120	133	17%	19
salida soluble L.F.	40	50	50	50	48	70%	5,0

Tabla N° E.24 Sólidos en todas sus formas para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)

Sólidos	Promedio Entrada(mg/l)	Promedio Salida (mg/l)	Desviación Entrada	Desviación Salida
Totales	368	375	41	38
Totales Fijos	291	314	18	23
Totales Volátiles	245	236	24	6
Totales Disueltos	220	214	22	19
Fijos Disueltos	123	139	19	32
Volátiles Disueltos	71	100	9	11
Totales Suspendidos	77	61	33	24
Fijos Suspendidos	25	22	15	18
Volátiles Suspendidos	52	39	24	23
Sedimentables (ml/L)	0,6	0	0,2	0

Tabla N° E.25 Registro de temperatura para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d)

Tiempo (hr)	Temperatura entrada °C	Desviación estándar	Temperatura a salida °C	Desviación estándar
8:00a.m.	26,8	1,0	26,1	1,0
9:00a.m.	27,1	1,3	26,4	1,5
10:00a.m.	26,9	0,9	27,1	0,6
11:00a.m.	27,6	1,6	28,4	2,1
12:00p.m.	27,0	1,6	28,4	1,9
1:00p.m.	27,5	1,5	29,0	1,6
2:00p.m.	27,5	1,1	29,0	1,6
3:00p.m.	26,8	2,1	29,0	2,5
4:00p.m.	27,0	1,8	28,6	2,6
5:00p.m.	26,5	1,3	28,0	1,8
6:00p.m.	26,6	1,3	27,4	1,4
7:00p.m.	26,6	1,5	27,0	1,2
8:00p.m.	26,3	1,3	26,0	1,2
9:00p.m.	26,5	1,1	26,1	1,3
10:00p.m.	26,6	1,1	26,0	1,2
11:00p.m.	26,5	1,0	26,3	1,5
12:00a.m.	26,6	1,3	25,9	1,4
1:00a.m.	26,5	1,1	25,5	1,0
2:00a.m.	26,0	1,4	25,5	1,0
3:00a.m.	26,3	1,2	25,5	1,0
4:00a.m.	26,3	1,2	25,5	1,0
5:00a.m.	26,4	1,2	25,3	0,5
6:00a.m.	26,4	1,2	25,3	0,5
7:00a.m.	26,4	1,2	25,4	0,5

Apéndice

Tabla N° E.26 Porcentaje de remoción del nitrógeno Kjeldahl para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ ha.d). Considerando tiempo de retención.

	Porcentaje de Remoción del Nitrógeno Kjeldahl (mg N / l)			% Remoción
	(28-15) /08/2006	(15-17) /08/2006	(17-19) /08/2006	Promedio
Salida Total	1,20%	28,13%	-	7,77%
Desviación Estándar	84%	262%	177%	
Salida Soluble	39,76%	46,88%	21,05%	35,90%
Desviación Estándar	11%	31%	41%	

Tabla N° E.27 Porcentaje de remoción del fósforo para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ha.d)

Sitio de la Captación	Fósforo Total Soluble (mg P / l) Muestras				Fósforo Total Soluble (mg P / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	08/08/06	15/08/06	17/08/06	19/08/06			
Entrada L.F.	2,49	2,82	1,79	2,69	2,45	0,46	
Salida L.F.	2,19	1,86	1,79	1,79	1,91	0,19	22%

Tabla N° E.28 Porcentaje de remoción de nitratos para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ha.d)

Sitio de la Captación	Nitratos (mg N / l) Muestras				Nitratos (mg N / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	08/08/06	15/08/06	17/08/06	19/08/06			
Entrada L.F.	0,671	0,632	0,499	0,728	0,633	0,10	
Salida L.F.	0,547	0,461	0,432	0,613	0,513	0,1	19%

Apéndice

Tabla N° E.29 Porcentaje de remoción de nitritos para la carga orgánica 306 (Kg DBO/ha.d)

Sitio de la Captación	Nitritos (mg N / l) Muestras				Nitritos (mg N / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	08/08/06	15/08/06	17/08/06	19/08/06			
Entrada L.F.	0,027	0,04	0,031	0,044	0,036	0,008	
Salida L.F.	0,025	0,036	0,031	0,027	0,030	0,005	16%

E.III.3.- Tercera carga operada 569 Kg DBO/ ha.d (6,5 MLD/ha).

Tabla N° E.30 Condiciones de estabilidad para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)

fecha de la captación	sitio de la captación	DBO(mg/l)
31/08/2006	entrada L.F.	
	salida L.F.	67
	salida soluble L.F.	75
01/09/2006	entrada L.F.	
	salida L.F.	63
	salida soluble L.F.	73
04/09/2006	entrada L.F.	
	salida L.F.	75
	salida soluble L.F.	80

Tabla N° E.31 Porcentaje de remoción en términos de DBO para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)

Sitio de la captación	DBO (mg/l) muestreo				DBO (mg/l) promedio	%Remoción	Desviación estándar
	05/09/06	06/09/06	07/09/06	08/09/06			
entrada L.F.	83	79	91	93	87		6,61
salida L.F.	58	52	59	61	58	34%	7,35
salida soluble L.F.	18,0	20,0	22,0	20,0	20	77%	1,63

Tabla N° E.32 Porcentaje de remoción en términos de DQO para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha*d)

Sitio de la captación	DQO (mg/l) muestreo				DQO (mg/l) promedio	%Remoción	desviación estándar
	05/09/06	06/09/06	07/09/06	08/09/06			
entrada L.F.	245	245	234	234	240		6,4
salida L.F.	173	184	156	156	167	30%	13,7
salida soluble L.F.	51	51	63	59	56	77%	6,0

Tabla N° E.33 Sólidos en todas sus formas para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)

Sólidos	Promedio Entrada(mg/l)	Promedio Salida (mg/l)	Desviación Entrada	Desviación Salida
Totales	390	373	19	15
Totales Fijos	326	333	16	11
Totales Volátiles	261	245	20	19
Totales Disueltos	240	231	6	14
Fijos Disueltos	130	128	7	23
Volátiles Disueltos	87	102	20	22
Totales Suspendidos	64	40	27	27
Fijos Suspendidos	21	14	21	8
Volátiles Suspendidos	43	26	26	32
Sedimentables (ml/L)	0,8	0,0	0,2	0,0

Tabla N° E.34 Registro de temperatura para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)

Tiempo (hr)	Temperatura entrada °C	Desviación estándar	Temperatura a salida °C	Desviación estándar
8:00a.m.	25,8	0,3	25,1	0,3
9:00a.m.	26,1	0,3	25,8	0,5
10:00a.m.	26,3	0,5	27,3	1,5
11:00a.m.	26,5	0,6	28,0	2,0
12:00p.m.	26,5	0,7	28,6	2,5
1:00p.m.	26,9	0,6	28,8	2,6
2:00p.m.	27,0	0,8	29,8	2,6
3:00p.m.	26,6	0,5	29,0	1,6
4:00p.m.	26,6	0,5	28,9	1,4
5:00p.m.	26,4	0,5	28,0	1,6
6:00p.m.	26,1	0,3	27,4	1,3
7:00p.m.	26,1	0,3	26,5	1,3
8:00p.m.	25,8	0,3	25,9	0,9
9:00p.m.	25,8	0,3	25,8	0,6
10:00p.m.	25,8	0,3	25,4	0,5
11:00p.m.	25,8	0,3	25,3	0,5
12:00a.m.	25,8	0,3	25,3	0,5
1:00a.m.	25,6	0,3	25,1	0,3
2:00a.m.	25,1	0,5	24,9	0,6
3:00a.m.	24,9	0,6	24,6	0,5
4:00a.m.	25,1	0,9	24,6	0,5
5:00a.m.	25,3	0,3	24,3	0,3
6:00a.m.	25,4	0,3	24,3	0,3
7:00a.m.	25,3	0,3	24,5	0,4

Apéndice

Tabla N° E.35 Porcentaje de remoción del nitrógeno total kjeldahl para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d). Considerando el tiempo de retención.

	Porcentaje de Remoción del Nitrógeno Kjeldahl (mg N / L)			%Remoción Promedio
	(05-06) /09/2006	(06-07) /09/2006	(07-08) /09/2006	
Respecto a:				
Salida Total	4,55%	20,28%	7,87%	10,90%
Desviación Estándar	58%	86%	28%	
Salida Soluble	34,34%	38,21%	25,28%	32,61%
Desviación Estándar	5%	17%	22%	

Tabla N° ° E.36 Porcentaje de remoción del fósforo para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)

Sitio de la Captación	Fósforo (mg P / l) Muestras				Fósforo Total Soluble (mg P / l) promedio	Desviación Estándar	
	05/09/06	06/09/06	07/09/06	08/09/06			
Entrada L.F.	3,16	3,06	1,96	2,43	2,65	0,56	
Salida L.F.	3,16	2,73	1,96	1,63	2,37	0,70	11%
					Fósforo Total		
Entrada L.F.	4,06	3,86	3,52	3,22	3,665	0,37	
Salida L.F.	3,92	3,29	1,83	3,22	3,065	0,9	16%

Tabla N° ° E.37 Porcentaje de remoción de nitratos para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ ha.d)

Sitio de la Captación	Nitratos (mg N / l) Muestras				Nitratos (mg N / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	05/09/06	06/09/06	07/09/06	08/09/06			
Entrada L.F.	0,48	0,423	0,461	0,575	0,485	0,065	
Salida L.F.	0,385	0,328	0,347	0,356	0,354	0,024	27%

Apéndice

Tabla N° ° E.38.- Porcentaje de remoción de nitritos para la carga orgánica 569 (Kg DBO/ha.d)

Sitio de la Captación	Nitritos (mg N / l) Muestras				Nitritos (mg N / l) promedio	Desviación Estándar	%Remoción
	05/09/06	06/09/06	07/09/06	08/09/06			
Entrada L.F.	0,0052	0,0058	0,006	0,008	0,006	0,001	
Salida L.F.	0,015	0,0058	0,0077	0,0084	0,009	0,004	-

APENDICE F

F.1.- Relación entre los parámetros Físico-Químico y Meteorológico

Tabla N° F.1 Variación horario de oxígeno disuelto a diferentes profundidades y la radiación solar. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.

Fecha 19/08/2006				
tiempo (hr)	Oxígeno disuelto (mg/l)			Radiación solar (cal*cm ² /hr)
	15 cm	45 cm	100 cm	
8:00 a.m	1,0	0,8	0,8	12,0
10:00 a.m.	5,0	0,6	0,6	14,0
12:00 p.m.	12,8	1,0	0,6	20,0
2:00 p.m.	14,0	1,0	0,4	13,2
4:00 p.m.	14,9	1,8	1,6	3,4
6:00 p.m.	11,8	1,0	0,8	2,0
8:00 p.m.	1,0	0,6	0,4	0,0
10:00 p.m.	1,0	0,4	0,5	0,0
12:00 a.m.	0,4	0,4	0,4	0,0
2:00 a.m.	0,4	0,4	0,4	0,0
4:00 a.m.	0,6	0,6	0,6	0,0
6:00 a.m.	0,6	0,6	0,4	2,0

Tabla N° F.2. Variación horaria de la temperatura a diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga orgánica 306 Kg DBO/ha.d.

Fecha 19/08/2006			
tiempo (hr)	Temperatura del Agua °C		
	15 cm	45 cm	100 cm
8:00 a.m.	25,3	25,0	25,0
10:00 a.m.	26,4	26,0	25,7
12:00 p.m.	27,4	26,3	25,7
2:00 p.m.	26,7	25,9	25,5
4:00 p.m.	26,6	25,7	25,5
6:00 p.m.	26,5	26,1	25,6
8:00 p.m.	25,5	25,5	25,7
10:00 p.m.	25,3	25,2	25,0
12:00a.m.	24,8	24,8	25,0
2:00a.m.	24,7	24,6	24,6
4:00 a.m.	23,9	24,3	24,2
6:00 a.m.	23,4	23,4	23,4

Tabla N° F.3 Variación horario de oxígeno disuelta a diferentes profundidades y la radiación solar. Carga orgánica 569 Kg DBO/ha.d.

Fecha 07/09/2006				
tiempo (hr)	Oxígeno disuelto (mg/l)			Radiación solar (cal*cm ² /hr)
	12 cm.	36 cm	100 cm	
8:00 a.m	0,6	0,4	0,4	11,4
10:00 a.m.	5,4	0,4	0,4	20,6
12:00 p.m.	7,8	1,0	0,8	24,8
2:00 p.m.	8,1	3,0	1,3	17,5
4:00 p.m.	9,2	0,4	0,3	4,8
6:00 p.m.	1,8	0,4	0,4	2,0
8:00 p.m.	0,6	0,4	0,4	0,0
10:00 p.m.	0,6	0,4	0,4	0,0
12:00 a.m.	0,8	0,6	0,4	0,0
2:00 a.m.	0,4	0,4	0,4	0,0
4:00 a.m.	0,4	0,4	0,2	0,0
6:00 a.m.	0,6	0,6	0,4	2,0

Tabla N° F.4.- Variación horario de la temperatura a diferentes profundidades de la laguna facultativa. Carga orgánica 569 KgDBO/ha.d.

Fecha 07/09/2006			
tiempo (hr)	Temperatura del Agua °C		
	12 cm	36 cm	100 cm
8:00 a.m.	25,0	25,0	25,0
10:00 a.m.	27,0	25,5	25,0
12:00 p.m.	28,0	26,0	25,0
2:00 p.m.	29,0	28,0	25,0
4:00 p.m.	28,5	27,5	26,0
6:00 p.m.	27,0	26,5	25,0
8:00 p.m.	26,0	26,0	25,0
10:00 p.m.	25,0	25,0	25,0
12:00a.m.	25,0	25,0	25,0
2:00a.m.	25,0	25,0	25,0
4:00 a.m.	24,5	24,5	24,5
6:00 a.m.	24,0	24,0	24,0

APENDICE G

G.1.- Cálculo de la masa aproximada de trazador retenida en la laguna

Sea M1 la masa de trazador inyectada al sistema.

Sea M2 la masa de trazador a la salida del sistema para un caudal constante, obtenido a partir de la integración numérica de la concentración respecto al tiempo, para el máximo tiempo de registro de concentración.

$$M2 = Q \int_0^{t_{máx}} C_0 dt$$

Entonces realizando un balance de masa se tiene la masa acumulada de trazador en la laguna.

$$Mac = M1 - M2$$

Una vez realizados los cálculos por el método de Simson para N par ^(Fogler, 2.000) se presentan los resultados en la tabla G1.

Masa de Trazador Inyectada (g)	Integral (C ₀ *dt) (µg*d/l)	Caudal (l/d)	Masa de Trazador a la Salida (g)	Masa de Trazador no Recuperada (g)	Recuperación (%)
15,5	897	14.400	12,9	2,6	83
70,0	1.77	31.680	56,1	13,9	80
95,0	1.812	46.080	83,5	11,5	88