

Evaluación del proceso y la eficiencia de remoción de la materia orgánica

en las lagunas de estabilización del municipio de La Ceja, Antioquia, Colombia

Recibido para evaluación: 23 de Julio de 2008
Aceptación: 1 de Agosto de 2008
Recibido versión final: 5 de Agosto de 2008

Roberto Mejía Ruiz¹

RESUMEN

En esta investigación se estudió la condición ambiental y el funcionamiento de las lagunas de estabilización para el tratamiento de las aguas residuales del municipio de La Ceja, Antioquia. Este sistema ha presentado deficiencias en su operación, reflejadas en problemas organolépticos, hidráulicos y metabólicos. El sistema de lagunas del municipio de La Ceja está conformado por dos lagunas anaerobias y una laguna facultativa, que reciben las aguas residuales domésticas provenientes de un alcantarillado combinado. En los años 2003 y 2004 se realizaron mediciones de variables físicas, químicas y biológicas, incluyendo tres muestreos generales.

El sistema funcionó deficientemente debido a problemas hidráulicos. La deficiencia del sistema estuvo acompañada de una baja remoción de nutrientes disueltos en la laguna facultativa asociada a un pobre desarrollo de la comunidad de microorganismos. El sistema presentó una remoción de carga orgánica del 75 %, asociada principalmente a la sedimentación en las lagunas anaerobias.

PALABRAS CLAVE: Lagunas de estabilización, Tratamiento de aguas residuales, Operación de lagunas de estabilización.

ABSTRACT

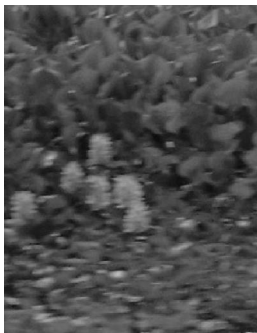
The stabilization ponds are known as efficient systems to treat domestic waste waters. However, there is not so much local knowledge about their setting and starting, monitoring and functioning. This paper is a research on the stabilization ponds in La Ceja town, Antioquia. These specific ponds have shown malfunctioning through organoleptic, hydraulic and metabolic problems. The ponds system in La Ceja, consists of two anaerobic ponds and a facultative ones, to which the domestic waste waters arrive through a combined sewage.

Measures of physical chemical and biological parameters were taken in 2003 and 2004 by three general monitoring activities. Samples were taken in five points of the system. In general, there were found that the system present a malfunctioning because hydraulic problems. Related with the biological changes of organic material was stated that the system provided an equivalent removal of 70% organic charge, mainly associated with settling in anaerobic ponds.

KEY WORDS: Stabilization ponds, Wastewater treatment, Operation of stabilization ponds.

¹ Profesor de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

rmejia@udea.edu.co



1. INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización son un sistema simple de tratamiento de las aguas residuales. Están constituidas por excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra y generalmente, se han diseñado de forma rectangular o cuadrada. Este método de tratamiento es indicado para países en vía de desarrollo y ubicados en el trópico [2, 4]. El tratamiento a través de lagunas tiene como propósitos remover la materia orgánica de las aguas residuales que ocasiona la contaminación en la fuente receptora, eliminar los microorganismos potencialmente patógenos que representan un grave peligro para la salud y utilizar su efluente con otras finalidades tales como el riego de suelos y en la piscicultura [2, 4, 5].

Dentro de las principales ventajas que tienen las lagunas como sistemas de tratamiento de aguas residuales se presentan las siguientes: bajos costos, necesitan poco o ningún componente mecánico, bajo consumo energético, no requieren de sistemas de recirculación de agua, son simples de construir y operar, no requiere de operarios especializados, pueden asimilar cambios significativos de cargas hidráulicas u orgánicas, fácil adaptación a variaciones climáticas, posibilidad de tratar vertimientos industriales de carácter biodegradables, elevada estabilización de carga orgánica, presentan remociones entre 60 y 90 % de DBO, producen un efluente de alta calidad, con excelente reducción de microorganismos patógenos y huevos de helmintos. Este aspecto es muy importante porque concierne al manejo ambiental y sanitario de las aguas residuales. Sin embargo, una de las desventajas del sistema de lagunas es que requieren grandes áreas de terreno que cualquier otro tipo de tratamiento de aguas residuales [2, 4, 5].

En las lagunas de estabilización, la remoción de materia orgánica expresada como DBO₅, se realiza a través de procesos biológicos anaerobios, aerobios o facultativos [2, 4].

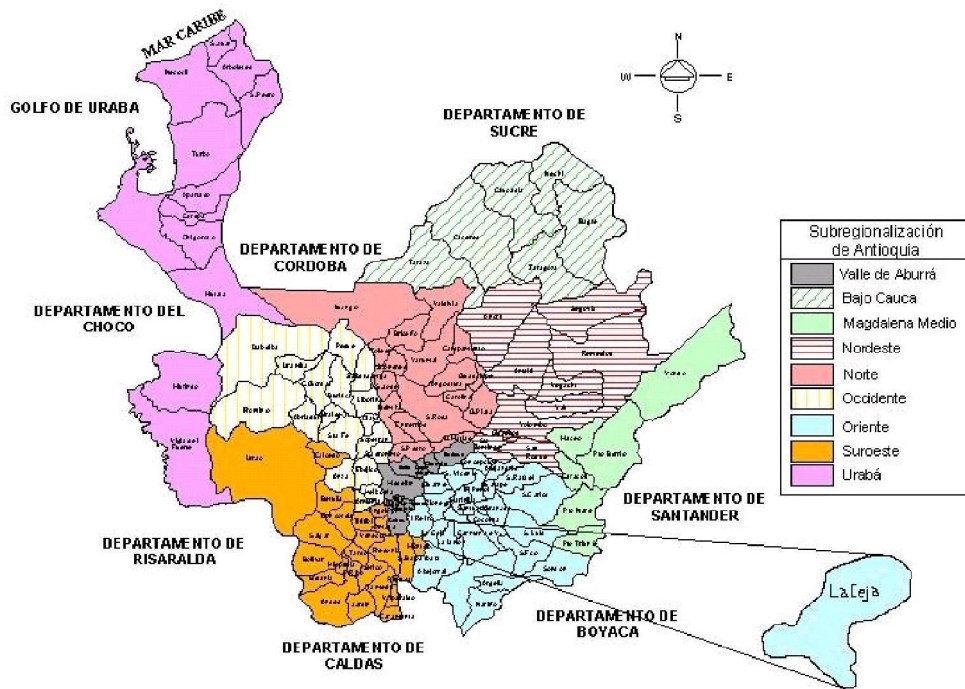
El objetivo general de esta investigación fue establecer la eficiencia del proceso de transformación de la materia orgánica del sistema de lagunas de estabilización y proponer acciones que permitiesen optimizar el sistema de tratamiento, haciendo énfasis en el manejo de los olores de las lagunas anaerobias, en acciones para el embombamiento de la membrana de las lagunas y en la optimización de la laguna facultativa para mejorar su eficiencia.

Zona de estudio

El sistema de tratamiento de aguas residuales estudiado, se encuentra en el municipio de La Ceja del Tambo perteneciente al suroriente del departamento de Antioquia, Colombia. El municipio está localizado a 2.200 msnm, 6°1'54" latitud norte y 75°25'47" latitud oeste. Posee una extensión de 131 km² de los cuales 99 km² pertenecen a piso térmico frío. La Ceja limita al norte con los municipios de Rionegro y Carmen de Viboral, al oriente con La Unión, al occidente con Montebello y El Retiro y al sur con Abejorral. En la figura 1 se muestra la ubicación del municipio de La Ceja.

Descripción del sistema de tratamiento. El sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja consta de un vertedero lateral que cumple la función de emitir los excesos de caudal, una rejilla de entrada para retención de sólidos gruesos, dos canales desarenadores controlados por una canaleta Parshall, una estructura de distribución de caudal a dos canales que entregan las aguas residuales a dos lagunas paralelas anaeróbicas que tienen una profundidad de 2,30 m y una laguna facultativa de 1,3 m. La laguna facultativa entrega su efluente a la quebrada La Pereira [6].

En la figura 2 se muestra la disposición del sistema de tratamiento de aguas residuales actual del municipio de La Ceja y en la figura 3 el esquema del sistema de tratamiento proyectado que incluye una laguna de maduración aún no construida.



Elaborado por el Departamento Administrativo de Planeación Año 2001

Figura 1 Localización general del municipio de La Ceja

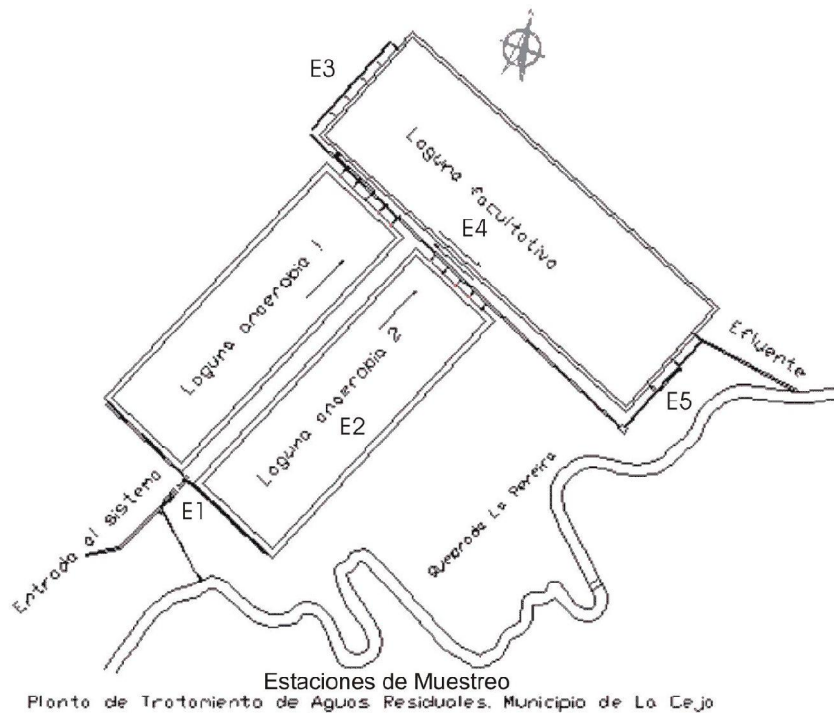


Figura 2 Plano del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja y la ubicación de las estaciones de muestreo (Sin escala) [8].

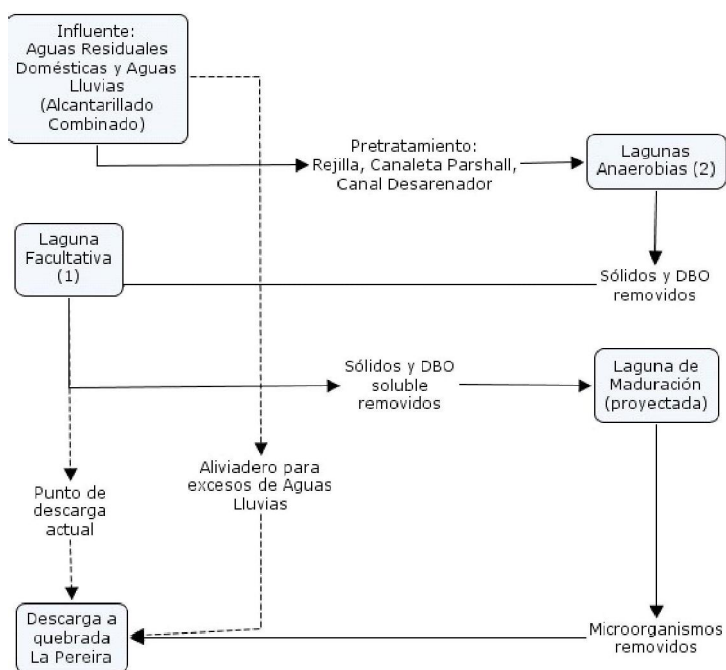


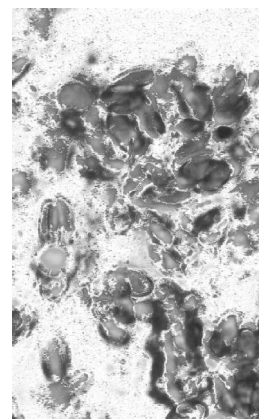
Figura 3 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento existente y proyectado.

Criterios de diseño. Los diseños fueron realizados por la firma Saneambiente (1998), y el sistema entró en operación en junio de 2002. Las lagunas anaerobias se diseñaron de acuerdo con los parámetros presentados en la Tabla 1[6].

Tabla 1 Parámetros de diseño de la laguna anaerobia.

Parámetro	Unidad	Valor asumido
Dotación acueducto	l/hab/día	200
Factor de mayoración para caudal máximo diario K1	unidimensional	1,2
Factor de retorno	unidimensional	0,85
Población de diseño	habitantes	67.900
Número de lagunas	número	2
Profundidad	m	2,5
Área de cada laguna	m ²	6.155
Concentración DBO afluente	mg/l	350,0
Temperatura del agua	°C	18,0
Caudal medio para cada laguna	l/s	78,6
Caudal máximo diario para cada laguna	l/s	94,3
Caudal de diseño para cada laguna	l/s	80,2

Volumen de cada laguna	m ³	15.388
Tiempo de retención	D	2,2
Acumulación de lodos	m ³ /hab/año	0,040
Periodo de desenlode	años	5,6
Eficiencia de remoción	%	50,0
DBO efluente	Mg/l	175,0
Carga orgánica afluente	kg DBO/día	2.400,0
Coliformes totales afluente	NMP/100 ml	9.300.000
Constante remoción coliformes Kb	l/día	1,7
Coliformes totales efluente	NMP/100 ml	2.110.000
Profundidad útil	m	2,3
Borde libre	m	0,2
Ancho superior	m	45,0
Ancho inferior	m	40,0
Largo superior	m	136,0
Largo inferior	m	131,0



Las lagunas facultativas se diseñaron de acuerdo con los parámetros presentados en la Tabla 2, [6].

Parámetro	Unidad	Valor asumido
Población de diseño	hab	67.900
Número de lagunas	número	1
Temperatura del agua	°C	18,0
Caudal medio	l/s	157,2
Caudal máximo diario	l/s	188,6
Caudal de diseño	l/s	160,4
Carga orgánica superficial máxima	kg DBO/Ha-día	216,50
Carga DBO afluente	kg DBO/Ha-día	2.419,0
Área requerida teórica	Ha	11,2
Área utilizada	Ha	1,0
Profundidad	m	1,50
Tiempo de retención	d	1,09
Carga orgánica volumétrica utilizada, λv	g DBO/m ³ -día	161,30

Tabla 2 Parámetros de diseño de la laguna facultativa.

Acumulación de lodos	m ³ /hab-año	0,03
Período de desenlode	año	2,4
Eficiencia en remoción	%	77,00
DBO efluente	mg DBO/l	40,30
Constante de remoción de coliformes Kb	l/día	1,70
Coliformes totales efluente	NMP/100 ml	740.000
Ancho superior	m	58,0
Ancho inferior	m	54,8
Largo superior	m	173,0
Largo inferior	m	169,8
Borde libre	m	0,20

Un aspecto crítico del proceso de construcción fue el aislamiento de las aguas subterráneas a través de la instalación de una geomembrana. Esta, presentó flotabilidad por embombamiento dada la generación de gases. Ello unido a la producción de olores generaron una condición crítica, tanto para el funcionamiento del sistema como para el impacto ambiental sobre los pobladores cercanos.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una visita de reconocimiento con el propósito de ajustar la metodología de los muestreos, corroborar los parámetros de diseño y las características fisicoquímicas.

Se efectuó un análisis detallado de todos los estudios realizados sobre el diseño del sistema de tratamiento del municipio de La Ceja, se revisó la información acerca de los parámetros de diseño reportados en la literatura y se comparó con los empleados en este caso.

Se realizaron dos evaluaciones batimétricas en cada laguna, una en septiembre de 2003 y otra en agosto de 2004. Para la construcción de los mapas batimétricos se establecieron en cada laguna líneas transectas: seis a lo largo y trece a lo ancho, empleando cuerdas de polietileno de 5 mm de diámetro. Luego, empleando dispositivos de medición de la profundidad, se procedió a medir ésta en los puntos de cruce de las líneas transectas. En cada punto se registro la profundidad y la posición X y Y. En todos los casos la profundidad se midió entre la superficie del agua y el fondo. Este último tuvo en cuenta la superficie del lodo y se excluyeron los sitios donde la geomembrana se elevó sobre la superficie del agua.

Se realizaron tres muestreos generales de las variables fisicoquímicas más importantes. Para la definición del número y ubicación de las estaciones del muestreo general se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: entrada y salida del agua en cada laguna y zonas de aguas abiertas en las lagunas. Estación E1, entrada del agua al sistema. E2, mitad laguna anaerobia. E3 salida laguna anaerobia o entrada laguna facultativa. E4, mitad laguna facultativa. E5, salida laguna facultativa (figura 2). Sin embargo, en este artículo se presentan los resultados de las estaciones más representativas del sistema: E1, E3 y E5. El muestreo general se realizó tres veces cubriendo las épocas seca, lluvia y transición, durante un período de un año. Las variables fisicoquímicas y los procedimientos de análisis se presentan en la tabla 3.



Variable	Unidad	Método	Referencia
Temperatura ambiente	°C	Lectura directa	Standard Methods
Caudal	l/s	Canaleta parshall	
Temperatura del agua	°C	Lectura directa	Standard Methods
Oxígeno disuelto	mg/L O ₂	Electrométrico	Standard Methods
pH	Unidad de pH	Electrométrico	4500-H+-B
Potencial redox	mV	Electrométrico	Standard Methods
Carbono orgánico total	Mg/L C	Combustión húmeda	Standard Methods
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Titulométrico	2320-B
Conductividad eléctrica	µmhos/cm	Electrométrico	2510-B
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Complexometría	Standard Methods
Dureza cálcica	mg/L Ca	Complexometría	Standard Methods
Dureza magnésica	mg/L Mg	Complexometría	Standard Methods
Nitrógeno total	mg/L N-	Kjeldahl	4500-NORG-B
Nitratos	mg/L N-NO ₃	Colorimétrico	4500+NO ₃ -D
Nitritos	mg/L N-NO ₂	Colorimétrico	4500-NO ₂ --B
Nitrógeno amoniacal	mg/L NH ₄	Destilación	4500-NH ₃ -E
Fósforo total	Mg/L P-PO ₄	Ácido ascórbico	4500-P-E
Hierro total	mg/l FeT	Fenantrolina	Standard Methods
Hierro soluble	mg/L FeS	Fenantrolina	Standard Methods
Sólidos totales	mg/L S.T	Gravimétrico	2540-B
Sólidos suspendidos	mg/L S.S	Gravimétrico	2540-D
Sólidos disueltos	mg/L S.D	Gravimétrico	2540-C
Sólidos sedimentables	mg/L S.Sd	Gravimétrico	2540-F
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	Gravimétrico	2540 E
Sulfatos	mg/L SO ₄		Standard Methods
Acidos grasos volátiles	mg/L		Standard Methods
DQO total y soluble	mg/L O ₂	Reflujo cerrado	5220 D
DBO ₅ total y soluble	mg/L O ₂	Winkler	Standard Methods

Tabla 3 Variables fisicoquímicas y métodos de análisis.

Para la recopilación de la información fisicobiótica, se diseñó una base de datos en Excel. A todos los datos, se aplicó estimadores estadísticos de tendencia central y dispersión empleando el programa Statgraphics versión 4.0. En algunos casos se efectuaron repeticiones de las mediciones *in situ* y en el laboratorio, con el fin de controlar el error experimental. Con el fin de determinar la eficiencia del sistema, fue determinado el porcentaje de remoción o variación de la DBO₅ y sólidos totales.

3. RESULTADOS

Caudal influente en las lagunas de estabilización. Las Empresas Públicas de La Ceja suministró la información sobre los caudales de ingreso al sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio. Con base en esta información, se calcularon los caudales promedios, máximo y mínimos que ingresan al sistema de tratamiento (Tabla 4).

Tabla 4. Valores del caudal de entrada al sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja.

Hora	Número de datos	Media (l/s)	varianza	Desviación estándar	Mínimo (l/s)	Máximo (l/s)	Rango (l/s)	Coefficiente de variación (%)
8	243	81.35	157.18	12.54	57.08	139.6	82.52	15.41
9	241	83.06	144.92	12.04	63.49	139.6	76.11	14.49
10	237	83.57	154.92	12.45	60.25	139.6	79.35	14.89
11	229	82.27	157.225	12.54	57.08	131.08	74.0	15.24
12	229	83.05	229.41	15.14	45.0	181.15	136.15	18.24
13	229	83.04	229.3	15.13	45.0	131.08	86.08	15.65
14	218	81.39	162.42	12.74	45.0	131.08	86.08	15.65
15	210	80.26	191.46	13.84	39.35	166.27	126.92	17.24
16	207	79.02	186.07	13.64	39.35	148.31	108.96	17.26
17	201	78.19	137.83	11.74	50.91	131.08	80.17	15.01

Solo se registraron lecturas entre las 8:00 y las 17:00 horas. De acuerdo a lo anterior y dados los bajos valores del coeficiente de variación se determinó como caudal medio 81.45 l/s.

Batimetría

En las Figuras 4 y 5 se muestran las curvas de nivel de las tres lagunas de las dos batimetrías realizadas.

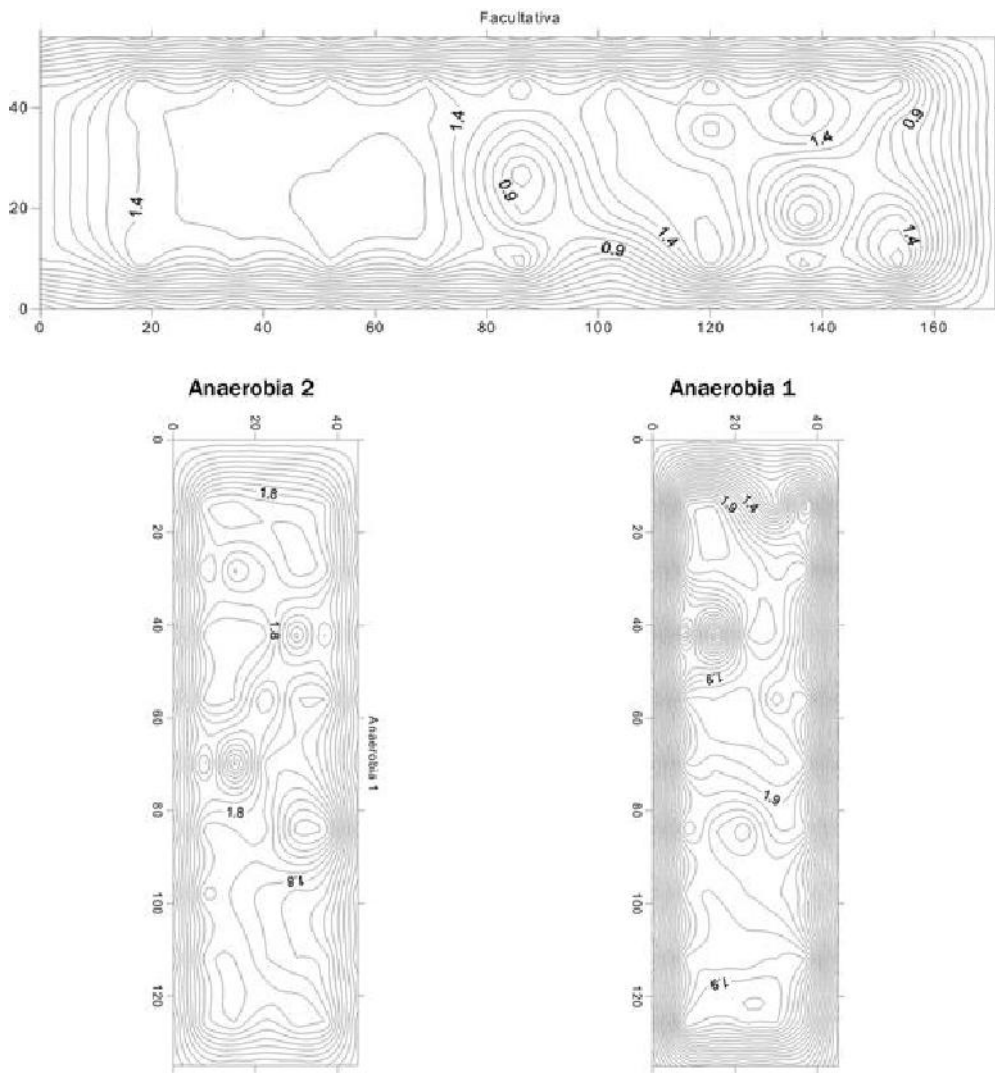


Figura 4 Curvas de nivel primera batimetría septiembre de 2003.

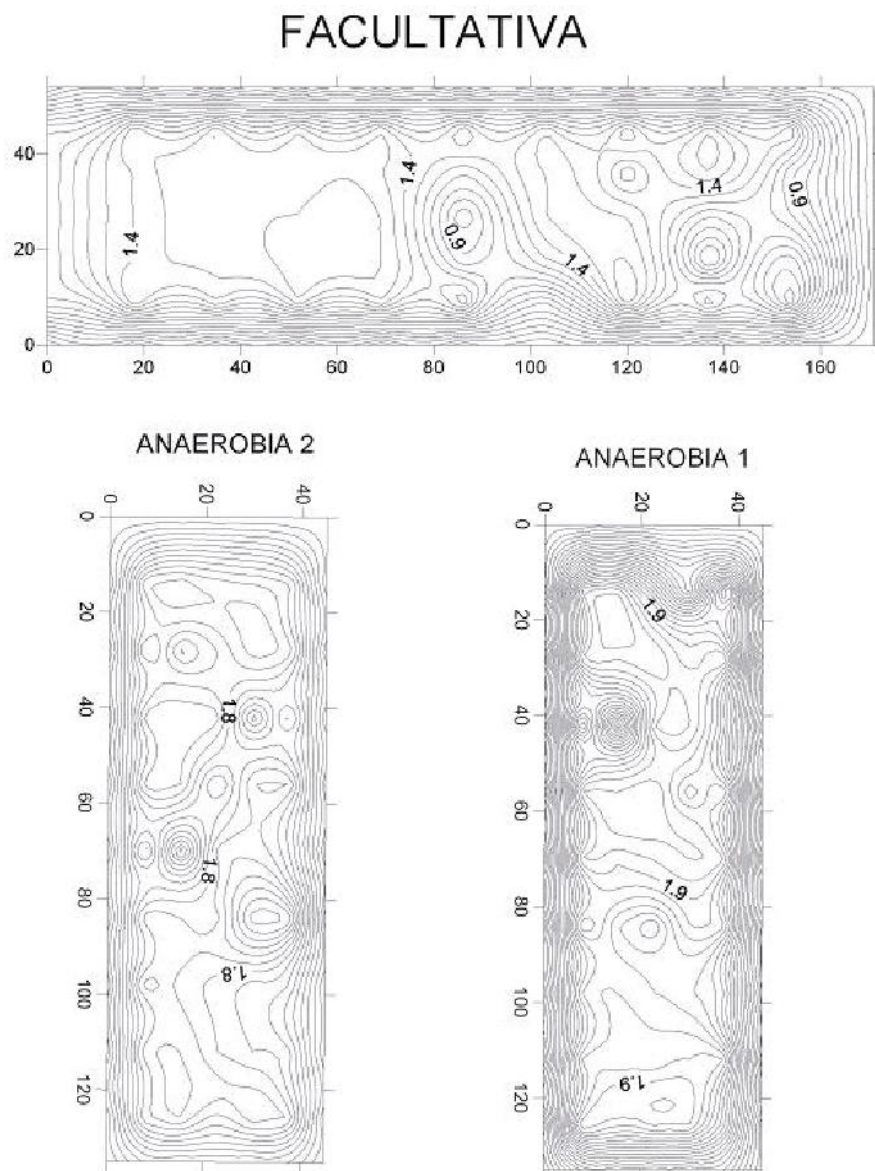


Figura 5 Curvas de nivel segunda batimetría agosto de 2004.

La geomembrana en las lagunas de estabilización fue instalada para evitar la contaminación de las aguas subterráneas y el derrumbamiento de los diques. La geomembrana existente presentó una serie de embombamientos causados por la producción de gases (Figura 6).



Figura 6 Aspecto panorámico de la laguna facultativa.

El levantamiento de la geomembrana, generó zonas muertas disminuyendo el volumen útil, el tiempo de retención y alterando las condiciones hidráulicas del sistema, ocasionando un funcionamiento deficiente del sistema. Esta membrana, en algunas zonas emergen a la superficie, en otros sitios solo sobresalen algunos centímetros sobre el fondo. Para verificar la pérdida de volumen en cada laguna se efectuaron dos batimetrías, la primera en agosto de 2003 y la segunda en agosto de 2004. Los volúmenes encontrados se presentan en la Tabla 5.

Muestreo	Volumen inicial	2003	2004	Promedio
Anaerobia 1	15.388 m ³	10.124,6 m ³	9.221,0 m ³	9672,8 m ³
Anaerobia 2	15.388 m ³	10.093,6 m ³	8.657,92 m ³	9375,76 m ³
Facultativa	15.051 m ³	9.778,8 m ³	10.005,75 m ³	9892,0 m ³

Tabla 5 Resultados del análisis batimétrico del volumen de las lagunas.

Muestreos fisicoquímicos.

En las tablas 6, 7 y 8 se muestran los resultados de las variables fisicoquímicas en las estaciones uno (entrada), tres (salida de la anaerobia) y cinco (salida del sistema).

En la tabla 6 se presentan los resultados estadígrafos de las variables fisicoquímicas en la estación uno (entrada al sistema) del muestreo general.

Tabla 6. Resultados estadísticos para las variables físicas y químicas de las muestras de agua obtenidas en la estación uno, en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja.

Variable	n	Media	varianza	Desviación estándar	mínimo	Máximo	rango	Coef Vari%
Temperatura ambiente °C	3	22.66	1.96	1.40	21.1	23.8	2.7	6.18
Temperatura del agua °C	3	20.0	0.31	0.56	19.4	20.5	1.1	2.78
Oxígeno disuelto (mg/l)	3	1.15	0.90	0.95	0.12	2.0	1.88	82.85
pH (Unidades)	3	7.27	0.01	0.10	7.17	7.38	0.21	1.45
Potencial redox (mV)	3	16.64	190.06	13.78	1.74	28.94	27.2	82.83
Carbono orgánico total (mg/l)	3	31.09	437.90	20.92	12.21	53.59	41.38	67.3
Alcalinidad total (mg/l)	3	181.67	1908.33	43.68	145.0	230.0	85.0	24.05
Conductividad eléctrica (Us/cm)	3	470.67	4190.33	64.73	396.0	511.0	115.0	13.75
Dureza total (mg/l)	3	44.67	177.33	13.32	36.0	60.0	24.0	29.81
Dureza cálcica (mg/l)	3	22.67	41.33	6.43	18.0	30.0	12.0	28.36
Dureza magnésica (mg/l)	3	22.0	336.0	18.33	6.0	42.0	36.0	83.33
Nitrógeno total (mg/l)	3	45.97	20.26	4.50	41.4	50.4	9.0	9.79
Nitratos (mg/l)	3	0.06	0.002	0.046	0.01	0.09	0.08	72.93
Nitritos (mg/l)	3	0.05	0.0012	0.035	0.01	0.07	0.06	69.28
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	3	23.07	8.74	2.96	20.5	26.3	5.8	12.82
Fósforo total (mg/l)	3	7.77	1.96	1.39	6.19	8.86	2.67	18.01
Hierro total (mg/l)	3	2.66	0.59	0.77	1.8	3.28	1.48	28.9
Hierro soluble (mg/l)	3	0.44	0.019	0.138	0.36	0.6	0.24	31.49
Sólidos totales (mg/l)	3	535.33	9702.33	98.50	437.0	634.0	197.0	18.39
Sólidos totales volátiles	3	277.0	4651.0	68.19	206.0	342.0	136.0	24.62

Sólidos totales fijos (mg/l)	3	258.33	960.33	30.98	231.0	292.0	61.0	11.99
Sólidos totales suspendidos (mg/l)	3	200.33	4304.33	65.60	128.0	256.0	128.0	32.74
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	3	157.16	3603.08	60.02	89.5	204.0	114.5	38.19
Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	3	43.0	61.0	7.81	38.0	52.0	14.0	18.16
Sólidos disueltos (ml/l hora)	3	335.33	1381.33	37.16	310.0	378.0	68.0	11.08
Sólidos sedimentables (mg/l)	3	2.46	2.12	1.45	0.8	3.5	2.7	59.06
Sulfatos (mg/l)	3	53.20	680.06	26.07	26.9	79.05	52.15	49.01
DQO total (mg/l)	3	601.67	12820.3	113.22	472.0	681.0	209.0	18.82
DQO filtrada (mg/l)	3	308.61	788.39	28.07	279.0	334.85	55.85	9.1
DBO total (mg/l)	3	337.67	7908.33	88.93	241.0	416.0	175.0	26.33
DBO filtrada (mg/l)	3	182.94	2540.77	50.40	126.0	221.84	95.84	27.55

En la Tabla 7 se presentan los resultados estadígrafos de las variables físico químicas en la estación tres (salida de la laguna anaerobia) del muestreo general.

Variable	n	Media	varianza	Desviación estándar	mínimo	Máximo	rango	Coef Vari%
Temperatura ambiente °C	3	25.2	4.89	2.211	22.7	26.9	4.2	8.78
Temperatura del agua °C	3	22.7	1.81	1.34	21.6	24.2	2.6	5.93
Oxígeno disuelto (mg/l)	3	0.80	0.326	0.57	0.36	1.45	1.09	70.78
pH (Unidades)	3	6.84	0.10	0.32	6.59	7.21	0.62	4.78
Potencial redox (mV)	3	-	1317.05 326.46	36.29	-358.4	-287.0	71.4	11.11
Carbono orgánico total (mg/l)	3	28.43	18.49	4.30	25.27	33.33	8.06	15.12
Alcalinidad total (mg/l)	3	183.33	2058.33	45.36	150.0	235.0	85.0	24.75
Conductividad eléctrica (Us/cm)	3	535.0	14673.0	121.13	402.0	639.0	237.0	22.64
Dureza total (mg/l)	3	49.0	469.0	21.65	29.0	72.0	43.0	44.2
Dureza cálcica (mg/l)	3	22.0	4.0	2.0	20.0	24.0	4.0	9.09

Tabla 7. Resultados estadígrafos para las variables físicas y químicas y biológicas de las muestras de agua obtenidas en la estación tres, en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja.

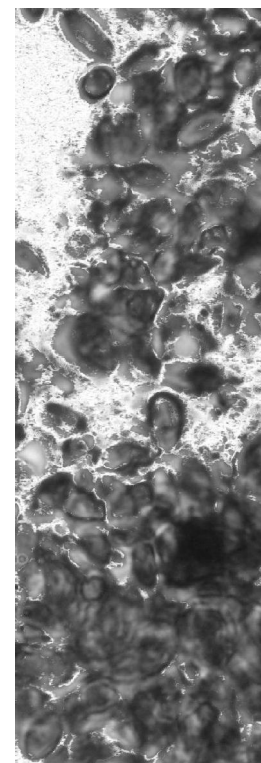
Dureza magnésica (mg/l)	3	27.0	439.0	20.95	9.0	50.0	41.0	77.6
Nitrógeno total (mg/l)	3	33.83	74.70	8.64	27.6	43.7	16.1	25.54
Nitratos (mg/l)	3	0.023	0.00003	0.0057	0.02	0.03	0.01	24.78
Nitritos (mg/l)	3	0.04	0.0004	0.02	0.02	0.06	0.04	50.0
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	3	21.2	114.67	10.70	12.1	33.0	20.9	50.51
Fósforo total (mg/l)	3	4.52	3.70	1.92	3.34	6.74	3.4	42.56
Hierro total (mg/l)	3	1.68	0.48	0.69	1.03	2.41	1.38	41.28
Hierro soluble (mg/l)	3	0.40	0.029	0.17	0.28	0.6	0.32	42.68
Sólidos totales (mg/l)	3	306.0	5356.0	73.18	256.0	390.0	134.0	23.92
Sólidos totales volátiles	3	113.66	932.33	30.53	84.0	145.0	61.0	26.86
Sólidos totales fijos (mg/l)	3	192.33	2116.33	46.00	160.0	245.0	85.0	23.92
Sólidos totales suspendidos (mg/l)	3	48.26	410.76	20.26	28.5	69.0	40.5	41.99
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	3	40.8	225.12	15.00	26.0	56.0	30.0	36.77
Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	3	7.46	27.80	5.27	2.5	13.0	10.5	70.62
Sólidos disueltos (mg/l)	3	258.0	2979.0	54.58	225.0	321.0	96.0	21.16
Sólidos sedimentables (ml/l hora)	3	0.033	0.0008	0.028	0.0	0.05	0.05	86.61
Sulfatos (mg/l)	3	12.98	215.18	14.66	3.78	29.9	26.12	112.98
DQO total (mg/l)	3	221.67	2564.33	50.63	189.0	280.0	91.0	22.84
DQO filtrada (mg/l)	3	165.38	959.93	30.98	131.0	191.14	60.14	18.73
DBO total (mg/l)	3	101.53	891.85	29.86	77.6	135.0	57.4	29.41
DBO filtrada (mg/l)	3	77.25	156.85	12.52	64.2	89.17	24.97	16.21

En la Tabla 8 se presentan los resultados estadígrafos de las variables físicoquímicas en la estación cinco, salida de del sistema.

Tabla 8. Resultados estadígrafos para las variables físicas y químicas de las muestras de agua obtenidas en la estación cinco (salida), en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja, durante los muestreos generales.

Variable	n	Media	varianza	Desviación estándar	mínimo	Máximo	rango	Coef Vari%
Temperatura ambiente °C	3	30.63	0.653	0.80	29.9	31.5	1.6	2.63
Temperatura del agua °C	3	24.93	0.703	0.838	24.4	25.9	1.5	3.36
Oxígeno disuelto (mg/l)	3	0.86	0.481	0.69	0.39	1.66	1.27	80.39
pH (Unidades)	3	7.11	0.108	0.329	6.88	7.49	0.61	4.63

Potencial redox (mV)	3	-298.3	2946.37	54.28	-	-	102.1	18.2
					360.0	257.9		
Carbono orgánico total (mg/l)	3	41.09	463.55	215.53	25.23	65.60	40.37	524.53
Alcalinidad total (mg/l)	3	180.0	1900.0	43.59	130.0	210.0	80.0	24.22
Conductividad eléctrica (Us/cm)	3	473.67	18372.3	135.55	389.0	630.0	241.0	28.62
Dureza total (mg/l)	3	33.0	399.0	19.97	11.0	50.0	39.0	60.53
Dureza cálcica (mg/l)	3	15.67	42.33	6.50	9.0	22.0	13.0	3.23
Dureza magnésica (mg/l)	3	17.33	257.33	16.04	2.0	34.0	32.0	92.55
Nitrógeno total (mg/l)	3	27.06	139.61	11.81	14.0	37.0	23.0	43.65
Nitratos (mg/l)	3	0.023	0.00023	0.015	0.01	0.04	0.03	65.47
Nitritos (mg/l)	3	0.036	0.00043	0.020	0.02	0.06	0.04	56.78
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	3	20.03	89.44	9.45	10.8	29.7	18.9	47.21
Fósforo total (mg/l)	3	4.93	4.60	2.14	3.17	7.32	4.15	43.52
Hierro total (mg/l)	3	1.36	0.17	0.42	0.96	1.8	0.84	30.88
Hierro soluble (mg/l)	3	0.36	0.025	0.15	0.19	0.5	0.31	43.5
Sólidos totales (mg/l)	3	300.33	2032.33	45.08	262.0	350.0	88.0	15.01
Sólidos totales volátiles	3	114.0	228.0	15.09	98.0	128.0	30.0	13.24
Sólidos totales fijos (mg/l)	3	186.33	974.33	31.21	164.0	222.0	58.0	16.75
Sólidos totales suspendidos (mg/l)	3	49.5	55.75	7.46	41.0	55.0	14.0	15.08
Sólidos suspendidos volátiles	3	44.5	90.25	9.5	34.0	52.5	18.5	21.35
(mg/l)								
Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	3	5.0	5.25	2.29	2.5	7.0	4.5	45.83
Sólidos disueltos (mg/l)	3	251.0	1699.0	41.21	221.0	298.0	77.0	16.42
Sólidos sedimentables (ml/l hora)	3	0.367	0.001	0.032	0.0	0.06	0.06	8.77
Sulfatos (mg/l)	3	10.79	85.09	9.22	0.86	19.09	18.23	85.46
DQO total (mg/l)	3	205.0	703.0	26.51	176.0	228.0	52.0	1.22
DQO filtrada (mg/l)	3	166.13	4.05	2.01	164.0	168.0	4.0	12.48
DBO total (mg/l)	3	82.66	327.94	18.10	66.1	102.0	35.9	21.9
DBO filtrada (mg/l)	3	65.39	56.10	7.49	58.9	73.59	14.69	11.45



5. CONSIDERACIONES FINALES

Al sistema está ingresando solo la mitad del caudal de diseño. Con ello, a medida que aumente el caudal, el sistema deberá funcionar más deficientemente.

El sistema de tratamiento como un conjunto funciona irregularmente. Se logran remociones significativas en la mayoría de los parámetros analizados, con relación a la DBO₅ total el sistema tiene una eficiencia del 75.5 %, pero si se analiza cada laguna en particular al observa que las

lagunas anaerobias funcionan adecuadamente presentando una eficiencia del 70 %, más no la facultativa. Esta última sólo alcanzó una eficiencia del 18.6 % a pesar de que sólo opera con la mitad del caudal de diseño. Con respecto a los sólidos totales el sistema logra una remoción del 43 %, las lagunas anaerobias tienen una eficiencia del 44% y la facultativa solo tuvo una remoción del 2 %.

La laguna facultativa presentó grandes deficiencias de funcionamiento pues la remoción de otros indicadores como son: la DQO y los sólidos totales fue mínimo. Las variables que teóricamente indican un buen funcionamiento de la laguna facultativa como el oxígeno disuelto, potencial redox, clorofila «a» y pH, estuvieron por debajo de los valores óptimos para este tipo de sistemas.

Con respecto al muestreo general se observó que entre muestreos las variables que mostraron mayor variación estuvieron asociadas al oxígeno disuelto, el sistema carbonato, los iones disueltos, las especies de nitrógeno, el fósforo total, el hierro soluble, los sólidos totales fijos y los sólidos disueltos. En términos espaciales se presentó variación en la mayoría de las variables fisicoquímicas. Esta situación sugiere que la variación espacial influyó significativamente sobre el conjunto de variables fisicoquímicas como consecuencia de la distribución diferencial de partículas disueltas y no disueltas en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja.

La temperatura del agua presentó un incremento gradual desde la entrada del sistema hacia la salida. Estos valores de temperatura mostraron que a una altura de 2200 m.s.n.m., este factor podría no ser limitante en el proceso de transformación anaerobia de la materia orgánica.

El oxígeno disuelto no mostró valores importantes en el epilimnio de la laguna facultativa durante el día, debido al no establecimiento consolidado de una comunidad de algas.

Con respecto al sistema pH - redox, se presentó una condición reductora en todo el sistema, mostrando que no se presentaron condiciones oxidativas en el epilimnio de la laguna facultativa. Esto corrobora un funcionamiento defectuoso de esta laguna.

En relación con los nutrientes se observó para las especies del nitrógeno, que el sistema tuvo niveles de remoción muy bajos, acompañados de un intenso proceso de reducción del nitrato en la laguna anaerobia. Igualmente ocurrió para el fósforo total donde sólo se removió éste en la laguna anaerobia.

En términos de remoción de los sólidos en el sistema, se encontró en esta investigación dos aspectos fundamentales: el primero, relacionado con la remoción de los sólidos sedimentables y los sólidos suspendidos totales en forma eficiente en la laguna anaerobia. Y el segundo, con la baja eficiencia de todo el sistema para la remoción de las demás formas de sólidos. En general a partir de la laguna anaerobia hasta el efluente de la laguna facultativa, no hubo remoción importante de sólidos.

El sulfato se presentó en todos los sitios de muestreo con ligeras oscilaciones relacionadas con la transformación del mismo en ácido sulfhídrico. Este último liberado a la atmósfera como consecuencia de dos factores: polimixis del sistema especialmente en la noche, durante la lluvia y días no soleados; y el segundo en estructuras de conexión y el cabezote de descarga del sistema, que generan agitación del agua y emisión de este gas (mal olor).

La remoción de grasas fue alta. Sin embargo, su extracción manual no permitió la consolidación de la costra superficial en las lagunas anaerobias. Esta situación favoreció la presencia de niveles de oxígeno en estas lagunas. La no formación de la costra y la presencia de oxígeno disuelto en las lagunas anaerobias, fueron dos factores altamente inhibitorios para el metabolismo anaerobio.

En el caso de la transformación biológica de la materia orgánica se pudo determinar que el sistema presentó una remoción del 70 %. Esta estuvo principalmente asociada a la sedimentación en la laguna anaerobia. La transformación de la materia orgánica medida como DBO total mostró que en la laguna anaerobia estuvo altamente relacionada con el factor gravitacional asociado a la sedimentación en el sistema. En el caso de la DBO soluble en la laguna anaerobia su remoción se asocio a la actividad moderada de los microorganismos sobre la misma en la columna de agua.



Para la laguna facultativa no se presentó una remoción importante en términos de DBO total y filtrada. En esta laguna el tiempo de retención hidráulico (1.4 días) y la carga influente, no permitieron un funcionamiento adecuado de este compartimiento.

Para mejorar el funcionamiento hidráulico del sistema se debe retirar la membrana, así se pueden corregir problemas como: corto circuitos, bajo tiempo de retención y pérdida de volumen útil. No se justifica instalar una nueva membrana dado que hay una colmatación de los poros del suelo con los sedimentos de las lagunas. Se deben proteger los taludes de las lagunas con la membrana existente.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo a las siguientes entidades: Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental –GAIA-, Universidad de Antioquia, Cornare y a las Empresas Públicas de La Ceja.

BIBLIOGRAFÍA

1. Mara, D. D., 1976. Sewage Treatment in Hot Climates. Eds. John Wiley & Sons. Londres.
2. Rolim, S. M., 2000. Sistemas de Lagunas de Estabilización. Ed. McGraw-Hill. Colombia.
3. RamalhO, R. S., 1996. Tratamiento de Aguas Residuales. Editorial Reverté S.A. Barcelona.
4. Romero, R. J., 1998. Lagunas Aireadas. En: Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Año 8. No 31. pp. 22-33.
5. Yáñez, F., 1992. Lagunas de estabilización. Teoría, Diseño, Eevaluación y Mantenimiento. Ministerio de Salud Pública, Subsecretaría de Saneamiento Ambiental y Obras Sanitarias, Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias.
6. Saneambiente Ltda., 1998. Rediseño de Interceptores y Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas para el Área Urbana del Municipio de La Ceja, Antioquia.
7. Metcalf and Eddy, 1972. Wastewater Engineering. United States. McGraw- Hill. pp. 582-598.
8. Aguirre, N. J., Mejía, R. y Múnera, C., 2007. Variación nictemeral de la calidad en las lagunas de estabilización del municipio de la Ceja, Antioquia. Revista # 40 Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.

