

Variación nictemeral de la calidad del agua en las lagunas de estabilización del municipio de La Ceja, Antioquia

*Néstor Jaime Aguirre Ramírez**, *Roberto Mejía Ruiz*, *María Constanza Múnera Morales*

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. A. A. 1226. Medellín, Colombia.

(Recibido el 19 de octubre de 2005. Aceptado el 29 de octubre de 2006)

Resumen

Se presentan los resultados del análisis de la calidad del agua de las lagunas de estabilización utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en el municipio de La Ceja, Antioquia, correspondientes a dos muestreos nictemerales (de 24 h) y dos muestreos generales realizados en el periodo 2002-2003. Se evaluaron variables físicas, químicas y biológicas en las dimensiones longitudinal y vertical de cada laguna. Entre las variables fisicoquímicas que mostraron variaciones importantes están la temperatura del agua con cambios significativos día-noche y el tiempo de retención hidráulico. Este último, en la laguna facultativa se configuró como factor limitante de crecimiento algal.

----- *Palabras clave:* lagunas de estabilización, calidad de agua, variación nictemeral, aguas residuales domésticas, eficiencia del sistema, nutrientes, DBO₅.

Nictemeral variation of the water quality in the lagoons of stabilization of the municipality of La Ceja, Antioquia

Abstract

The results of the water quality analysis of the stabilization lagoons used for wastewater treatment in the municipality of La Ceja, Antioquia are presented. The water quality data were collected in two nictemerale field samplings (of 24 h) and two general field samplings made during 2002-2003. Physical, chemical and biological variables were evaluated in longitudinal and vertical dimensions of

* Autor de correspondencia: telefaxis: +57+4+210 65 62, Fax: +57+4+263 82 82, correo electrónico: naguirre@udea.edu.co (N. J. Aguirre).

each lagoon. Among the physical and chemical variables, the water temperature with significant day-night changes and the hydraulic detention time showed important variations. The later, in the facultative lagoon, was the limitant factor of algal growth.

----- *Key words:* stabilization lagoons, water quality, nictemeral variation, domestic wastewater, system efficiency, nutrients, BOD₅.

Introducción

Durante muchos años, la preocupación básica de ingenieros y científicos en cuanto al tratamiento del agua se orientó hacia la producción de agua potable. Cuando el crecimiento de las ciudades y la industrialización afectaron los cuerpos de agua creando problemas epidemiológicos, ecológicos y de reuso de aguas, se presentó la necesidad de proceder a depurar o tratar las aguas residuales [1].

Cuando las aguas residuales se descargan a un sistema de lagunas de estabilización, se realiza un proceso conocido con el nombre de auto-depuración o estabilización natural, en el que ocurren procesos de tipo físico, químico y biológico. Las lagunas se emplean para tratar aguas residuales domésticas, pero también pueden tratar aguas residuales industriales provenientes de actividades como mataderos, lecherías, industrias de frutas o en combinación con otros sistemas [2, 3]. El empleo de lagunas como un recurso técnico o como un medio aceptado con este propósito, se ha desarrollado en la segunda mitad del siglo xx [1].

Entre los procesos de tratamiento de aguas residuales utilizados en países del Tercer Mundo, las lagunas de estabilización han sido el método más empleado, debido a su bajo costo de construcción, a la reducción de agentes patógenos, necesitan pocos componentes importados, bajo consumo energético, son simples de construir y operar, confiables y fáciles de mantener y sus efluentes tienen la posibilidad de ser reutilizados ya que son de alta calidad, lo cual es muy importante en el caso de los países en desarrollo donde no existen ni los recursos ni el personal necesario para utilizar las tecnologías de los países desarrollados [3, 4].

En Colombia, la disposición de aguas residuales se hace en su mayoría en los diferentes cuerpos de aguas como corrientes superficiales, lagunas, ciénagas, estuarios, mares y otros ambientes. De los 1.064 municipios que existen en el país, son muy pocos los que cuentan con algún sistema

de tratamiento, así como son muy pocos los que utilizan lagunas de estabilización para llevar a cabo este fin. En el departamento de Antioquia, sólo cinco municipios cuentan con lagunas de estabilización como sistema de tratamiento de sus aguas residuales y están ubicadas en el Oriente antioqueño: La Ceja a una altura de 2.200 msnm, Concepción a 1.875 msnm, Puerto Triunfo a 150 msnm y en el noroccidente, Necolí a 8 msnm y Arboletes a 4 msnm.

En este trabajo, se obtuvo información sobre las características del agua del sistema de lagunas de estabilización del municipio de La Ceja, Antioquia. Se analizó el comportamiento de algunas variables físicas, químicas y biológicas del agua relacionadas con su funcionamiento, con el fin de evaluar la variación de éstas en el espacio y el tiempo.

Zona de estudio

El sistema de tratamiento de aguas residuales que se estudió, se encuentra ubicado en el municipio de La Ceja del Tambo, el cual pertenece al suroriente del departamento de Antioquia, Colombia. El municipio posee una población de 45.255 habitantes y está localizado a 2.200 msnm, 6° 1' 54" latitud norte y 75° 25' 47" latitud oeste. Posee una temperatura ambiente promedio de 18 °C y una extensión de 131 km² de los cuales 99 pertenecen a piso térmico frío. Los niveles de precipitación anuales oscilan alrededor de 2.300 mm (figura 1).

Descripción del sistema de lagunas

Descripción del sistema de tratamiento. El sistema consta de una rejilla de entrada para retención de sólidos gruesos, un canal de entrada (canaleta Parshall) precedido de un vertedero lateral para derivar el exceso de aguas lluvias, una estructura que distribuye el caudal a dos canales que entregan las aguas residuales a dos lagunas paralelas anaeróbicas que tienen una profundidad de 2,15 y 2,37 m, respectivamente, y una laguna facultativa de 1,3 m. La laguna facultativa entrega su efluente a la quebrada La Pereira [5] (figura 2).

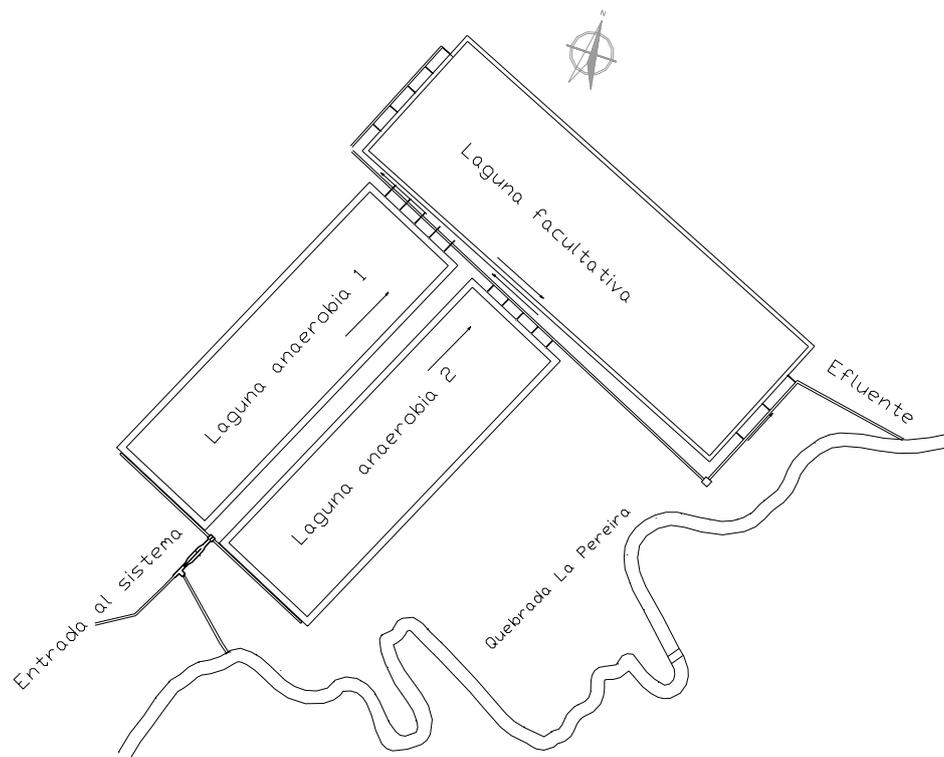


Figura 1 Localización general de la zona de estudio

Metodología

En enero y octubre de 2002 se realizaron dos premuestras con mediciones en la entrada al sistema (Canaleta Parshall), salida de una laguna anaerobia y a la salida de la laguna facultativa. Con el propósito de estudiar el sistema lagunar, se empleó un diseño nictemeral, es decir,

muestras de 24 h, realizados en enero de 2003. Estos consistieron en la medición sucesiva de las variables respuesta cada cuatro horas tanto en la entrada y salida de cada laguna como al interior de ellas. Igualmente se midieron algunas variables en cada laguna en la columna de agua a tres profundidades con el fin de evaluar la variación vertical de las variables.



Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Municipio de La Ceja

Figura 2 Planta de tratamiento de aguas residuales, municipio de La Ceja

Se determinaron variables puntuales como: temperatura del aire y del agua, intensidad de la luz, oxígeno disuelto, potencial de oxidorreducción, pH, CO₂ y conductividad eléctrica. Mediante la utilización de la canaleta Parshall que hace parte del sistema, se obtuvieron los datos de caudal registrados durante los muestreos.

En el laboratorio se analizaron las variables: DBO₅, DQO, fósforo total, nitrógeno total, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles y sólidos disueltos volátiles y coliformes totales y fecales. Estas variables fueron medidas en la entrada al sistema, en el centro de la primera laguna anaerobia, en el centro de la segunda laguna anaerobia, en el efluente de la primera laguna anaerobia, en el centro de la laguna facultativa y en el efluente de la laguna

facultativa, a las 6:00 p. m. y 6:00 a. m. en cada muestreo. Las variables fisicoquímicas se determinaron siguiendo los lineamientos establecidos por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [6] al igual que para el estudio bacteriológico, el cual incluyó el análisis de coliformes totales y coliformes fecales por el método del NMP (número más probable).

La clorofila “a” se determinó solamente en la laguna facultativa, tomando muestras subsuperficiales entre las 10 a. m. y las 2 p. m. una vez por muestreo y en la mitad de la laguna, siguiendo los lineamientos propuestos por Wetzel y Likens [7].

Las muestras de fitoplancton de los dos muestreos nictemerales fueron obtenidas con arrastre subsuperficial empleando una red de fitoplancton;

el material obtenido fue fijado con una solución de lugol al 10% y refrigerado a 5 °C hasta su observación. En el laboratorio, las muestras fueron agitadas y se tomó 1 ml de cada muestra, que fue depositado en una cámara Sedwick Rafter de 1 ml de capacidad. La cámara fue ajustada a un microscopio invertido tipo Leica Ortholux Wetzlar. Las observaciones fueron cualitativas a través de un recorrido sinusoidal, para un total

de 30 campos observados por muestra, con el objetivo de 40X.

Resultados

En la tabla 1 se presentan los resultados de las variables fisicoquímicas muestreadas cada cuatro horas, en cuatro fechas de muestreo y reportadas por los estadígrafos n , \bar{x} , S y Cv .

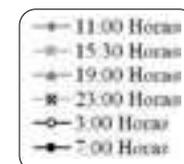
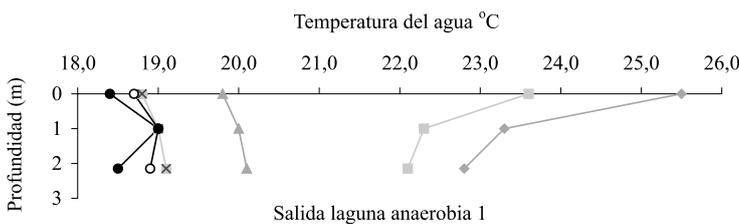
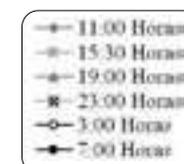
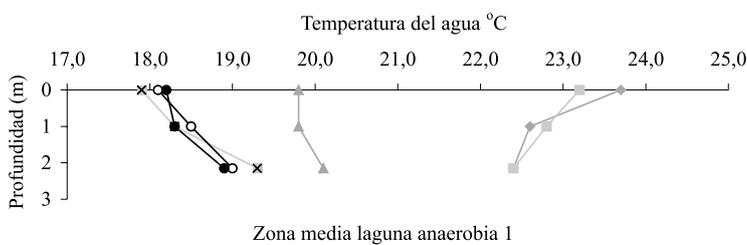
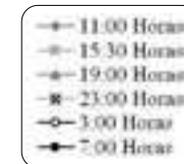
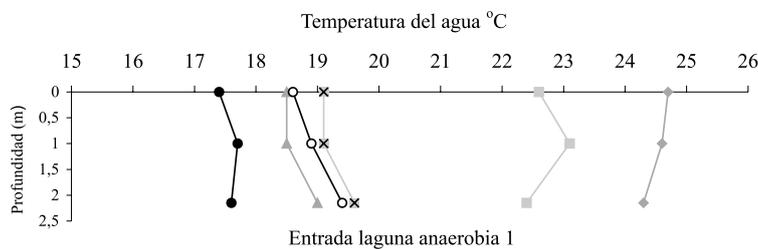
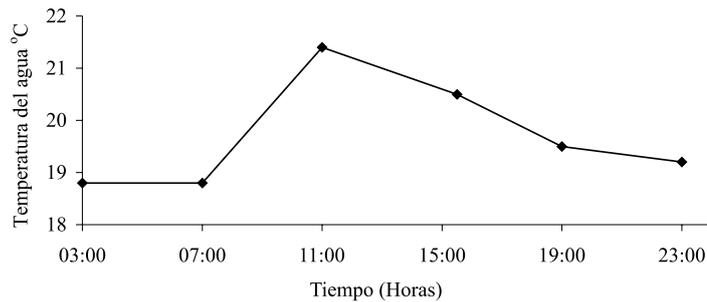
Tabla 1 Resultados estadísticos de las variables fisicoquímicas monitoreadas cada cuatro horas

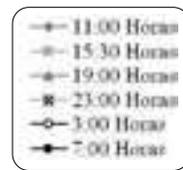
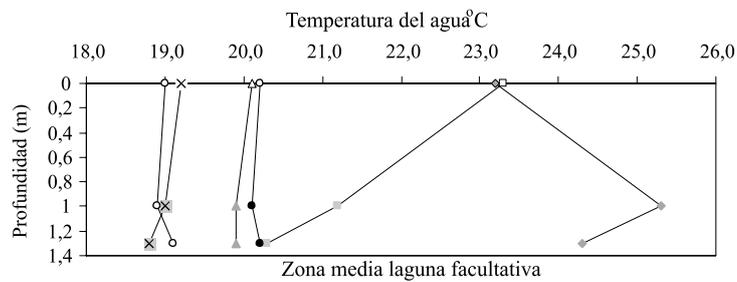
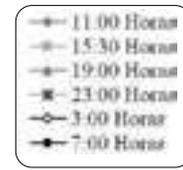
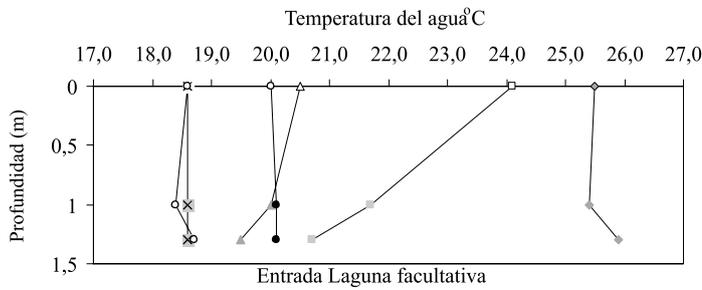
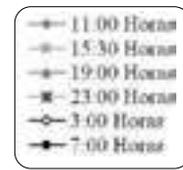
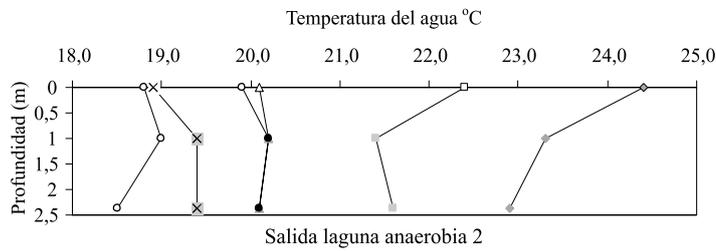
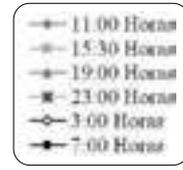
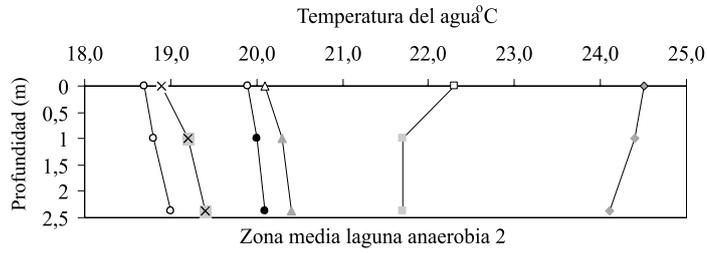
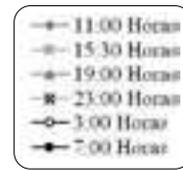
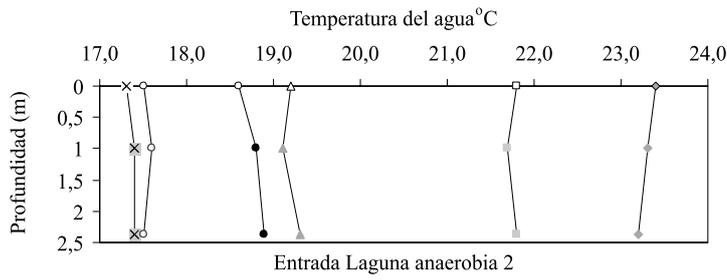
Muestreo	Estadígrafos	Estación									
		Laguna anaerobia 2					Laguna facultativa				
		$T\text{ }^{\circ}\text{C}$ (agua)	OD	CO_2	pH	CE	$T\text{ }^{\circ}\text{C}$ (agua)	OD	CO_2	pH	CE
Premuestreo 1		22,00	0,60	-	6,70	690,0	25,00	5,10	-	7,20	669,00
Premuestreo 2		21,40	0,40	-	7,02	440,0	21,80	0,30	-	7,10	457,00
Muestreo 1	n	54,00	54,00	-	54,00	54,0	54,00	54,00	-	54,00	54,00
Muestreo 1	\bar{x}	20,30	0,65	-	7,06	625,0	20,80	0,85	-	7,28	612,00
Muestreo 1	S	2,00	0,43	-	0,08	21,2	2,20	0,91	-	0,14	19,92
Muestreo 1	Cv	4,00	0,19	-	0,01	448,0	4,90	0,84	-	0,02	397,00
Muestreo 2	n	54,00	54,00	54,0	54,00	54,0	54,00	54,00	54,0	54,00	54,00
Muestreo 2	\bar{x}	20,40	0,64	71,0	6,80	676,0	20,60	0,80	57,7	7,00	674,00
Muestreo 2	S	1,56	0,40	13,0	0,09	28,8	2,27	0,50	10,2	0,12	29,80
Muestreo 2	Cv	2,44	0,16	169,0	0,01	830,0	5,13	0,25	104,0	0,01	889,00

Muestreo	Estadígrafos	Estación									
		Entrada al sistema					Laguna anaerobia 1				
		$T\text{ }^{\circ}\text{C}$ (agua)	OD	CO_2	pH	CE	$T\text{ }^{\circ}\text{C}$ (agua)	OD	CO_2	pH	CE
Premuestreo 1		19,70	1,20	-	6,50	719,0	22,00	0,50	-	6,70	700,00
Premuestreo 2		20,10	0,50	-	7,05	378,0	21,40	0,40	-	7,02	440,00
Muestreo 1	n	6,00	6,00	-	6,00	6,0	54,00	54,00	-	54,00	54,00
Muestreo 1	\bar{x}	19,70	0,61	-	7,42	611,0	20,30	0,54	-	7,03	640,00
Muestreo 1	S	1,01	0,29	-	0,23	160,0	2,20	0,25	-	0,08	46,90
Muestreo 1	Cv	1,09	0,09	-	0,06	25.590,0	5,00	0,07	-	0,01	2.200,00
Muestreo 2	n	6,00	6,00	6,0	6,00	6,0	54,00	54,00	54,0	54,00	54,00
Muestreo 2	\bar{x}	19,10	0,90	34,5	7,15	640,0	20,56	0,65	68,9	6,80	677,00
Muestreo 2	S	1,57	0,60	14,8	0,14	188,3	1,42	0,41	14,3	0,07	59,30
Muestreo 2	Cv	2,46	0,37	220,0	0,02	35.443,0	2,00	0,17	205,0	0,01	3.521,00

En las figuras 3 y 4 se presenta la variación nictemeral de cada variable fisicoquímica, en nueve sitios de muestreo y a tres profundidades en la columna de agua.

Temperatura del agua. En la figura 3 se muestra la variación nictemeral de la temperatura del agua en el primer muestreo. En la figura 4 se presenta la variación nictemeral de la temperatura en el segundo muestreo.





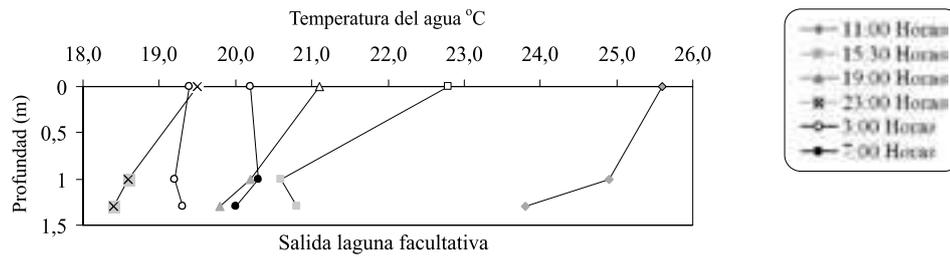
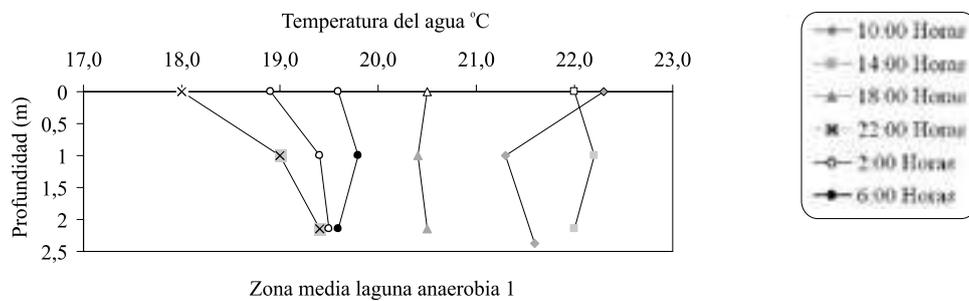
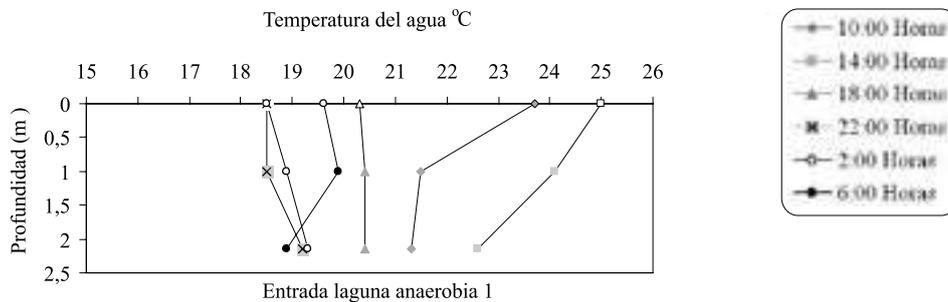
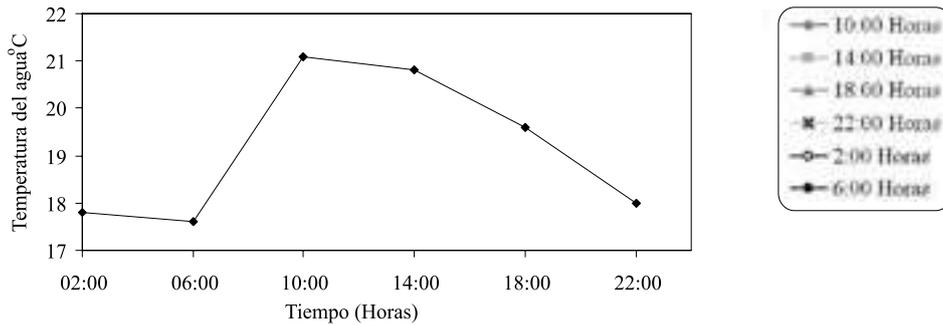
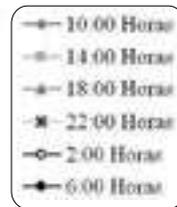
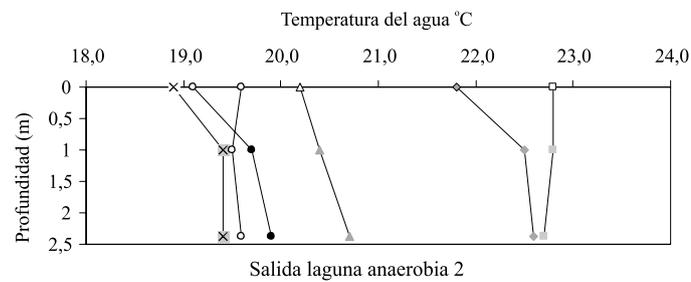
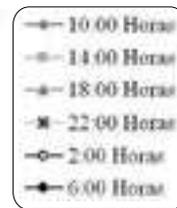
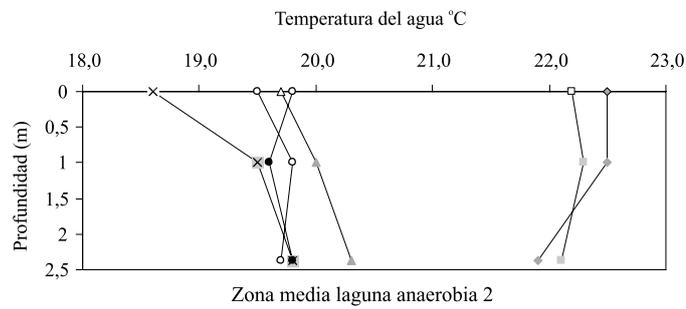
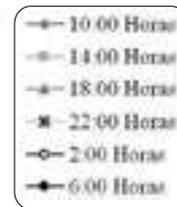
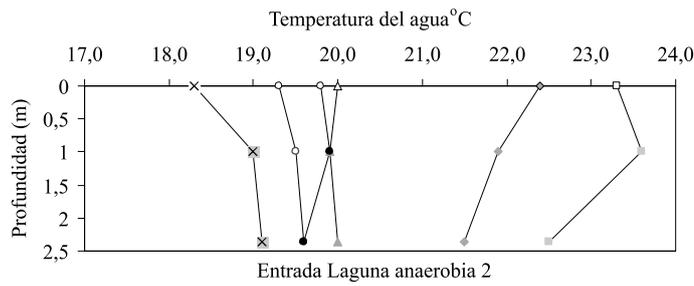
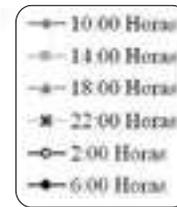
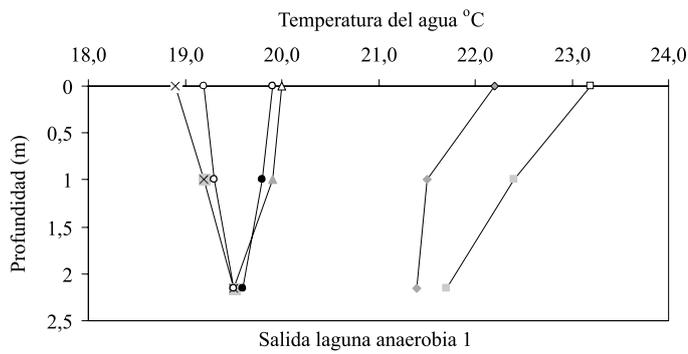


Figura 3 Variación nictemeral de la temperatura del agua con la profundidad en nueve sitios del sistema de lagunas de estabilización de las aguas residuales del municipio de La Ceja, Antioquia, durante el primer muestreo





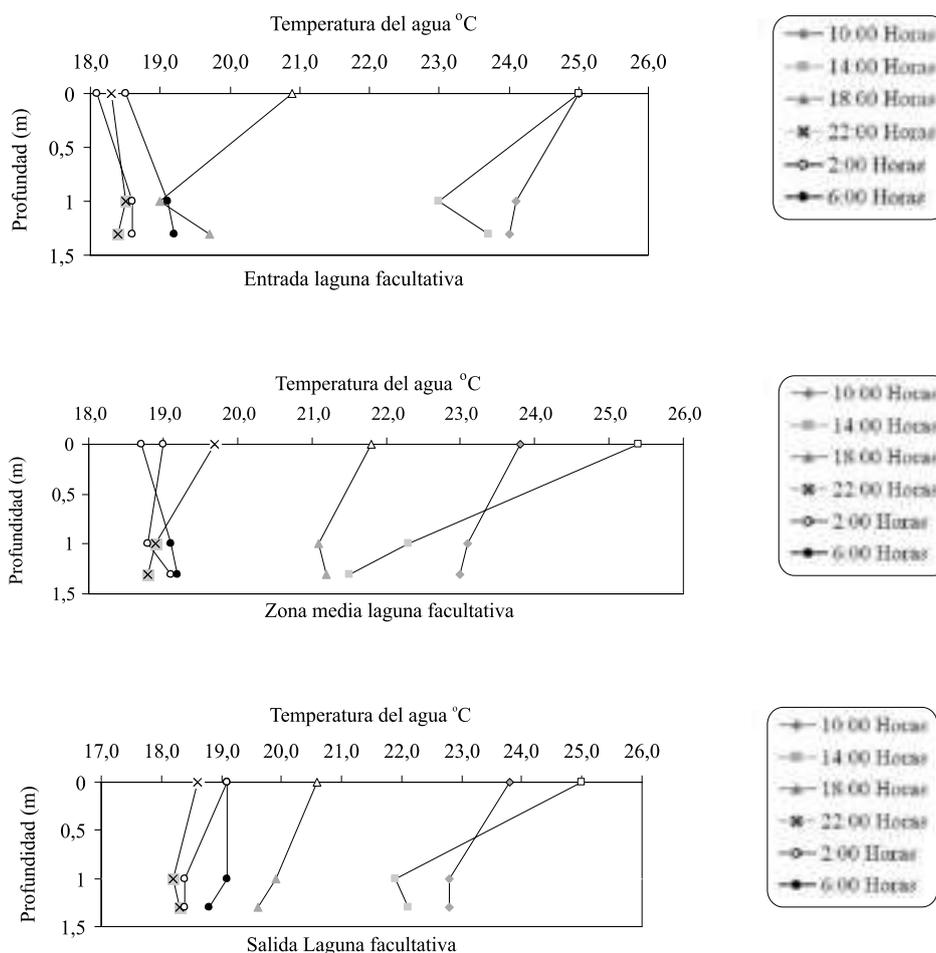


Figura 4 Variación nictemeral de la temperatura del agua con la profundidad en nueve sitios del sistema de lagunas de estabilización de las aguas residuales del municipio de La Ceja, Antioquia, durante el segundo muestreo

Oxígeno disuelto. En las lagunas anaerobias se observó una tendencia general de homogeneidad en la columna de agua, con valores bajos de oxígeno disuelto. En la laguna facultativa se registraron valores de oxígeno disuelto en la superficie que variaron desde 2 hasta 6 mg/l, pero registros bajos hacia el fondo, mostrándose una tendencia decreciente de esta variable con la profundidad.

CO₂. El CO₂ mostró en general una tendencia homogénea en la columna de agua con leves variaciones crecientes y decrecientes relacionadas con las leves variaciones del oxígeno disuelto.

pH. Los perfiles de pH en las lagunas anaerobias como en la facultativa, tanto en el primer como en el segundo muestreo, no tuvieron variaciones significativas, evidenciando una distribución ortógrada en la columna de agua en todos los muestreos. Los valores de pH en la laguna facultativa fueron ligeramente mayores que en las lagunas anaerobias en las horas diurnas.

Conductividad eléctrica. En general, en la columna de agua no se observaron variaciones significativas de la conductividad eléctrica, su comportamiento fue homogéneo durante los muestreos en casi todos los sitios monitoreados.

En la tabla 2 se consignan los principales estadígrafos de las variables químicas observadas cada doce horas durante los muestreos.

En las figuras 5 y 6 se presenta la variación temporal de las principales variables fisicoquímicas en las diferentes fechas de muestreo.

Tabla 2 Resultados estadísticos de las variables fisicoquímicas monitoreadas cada cuatro horas

<i>Muestreo</i>	<i>Todos los muestreos</i>	<i>Estadígrafos</i>			
		<i>n</i>	\bar{x}	<i>S</i>	<i>Cv</i>
Entrada al sistema	P	5	7,19	1,69	2,85
	N	5	42,20		
	DBO ₅	5	367,54	57,77	
	DQO	5	608,57	123,77	
	ST	5	651,20		
	SST	5	277,88		
	G	3	120,00		
Laguna anaerobia 1 centro	P	4	7,44	0,40	0,16
	N	4	33,80		
	DBO ₅	4	161,50	27,72	
	DQO	4	371,10	45,04	
	ST	4	457,25		
	SST	4	121,38		
	G	2	58,60		
Laguna anaerobia 2 centro	P	4	6,84	0,31	0,09
	N	4	31,40		
	DBO ₅	4	143,00	20,84	
	DQO	4	284,95	35,75	
	ST	4	417,50		
	SST	4	84,88		
	G				
Efluente laguna anaerobia 1	P	5	5,77	1,86	3,46
	N	5	27,60		
	DBO ₅	5	115,62	29,61	
	DQO	5	249,20	23,75	
	ST	5	343,60		
	SST	5	51,86		
	G	3	50,00		
Laguna facultativa centro	P	4	6,58	0,49	0,24
	N	4	28,00		
	DBO ₅	4	92,78	4,60	
	DQO	4	219,98	28,14	
	ST	4	365,00		
	SST	4	71,75		
	G				
Efluente laguna facultativa	P	5	5,43	2,03	4,11
	N	5	26,90		
	DBO ₅	5	79,12	10,69	
	DQO	5	198,84	21,40	
	ST	5	335,20		
	SST	5	49,60		
	G	3	34,40		

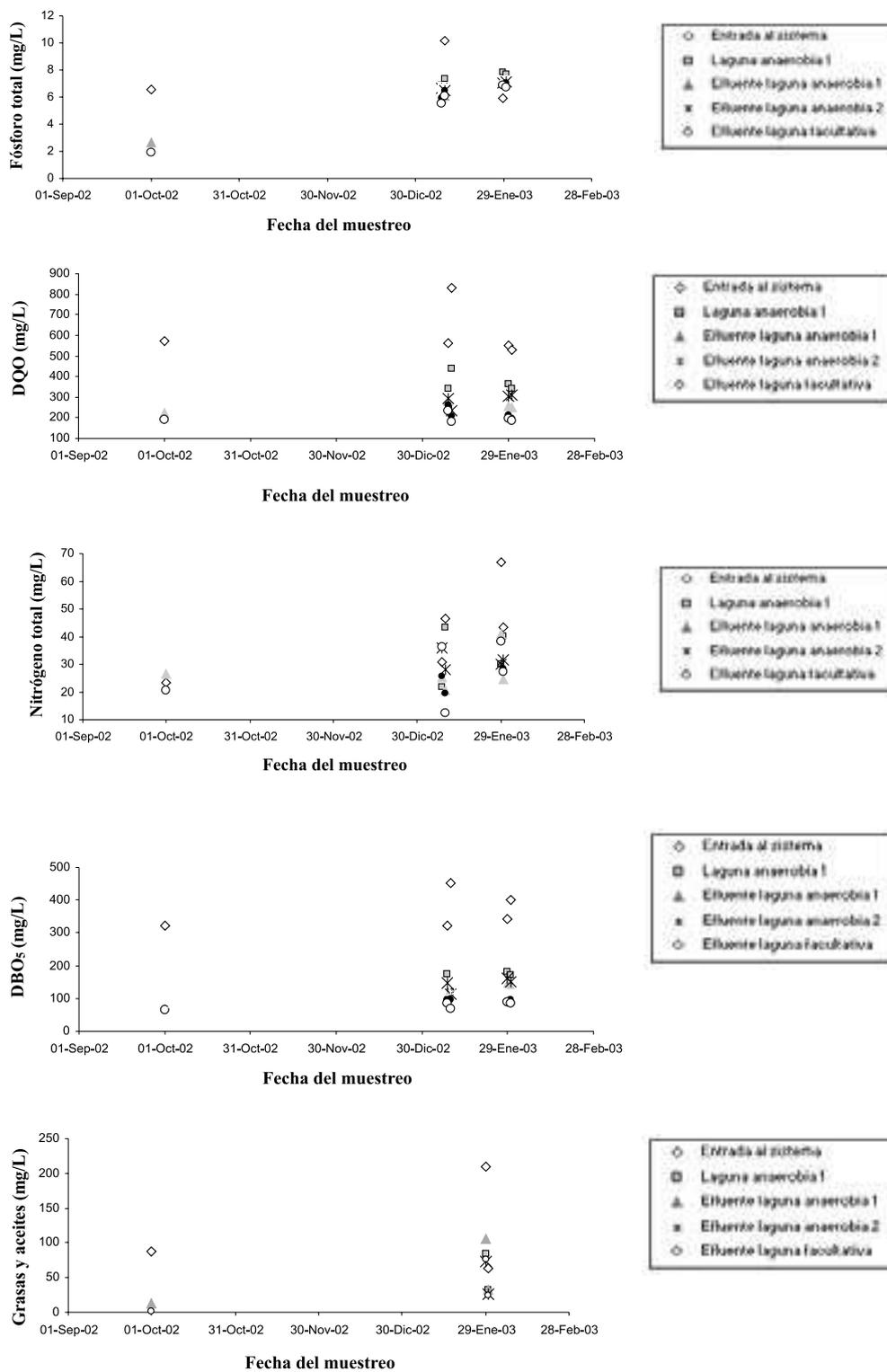


Figura 5 Variación nictemeral de algunos parámetros físico-químicos en el sistema de lagunas de estabilización de las aguas residuales del Municipio de La Ceja-Antioquia durante todos los muestreos

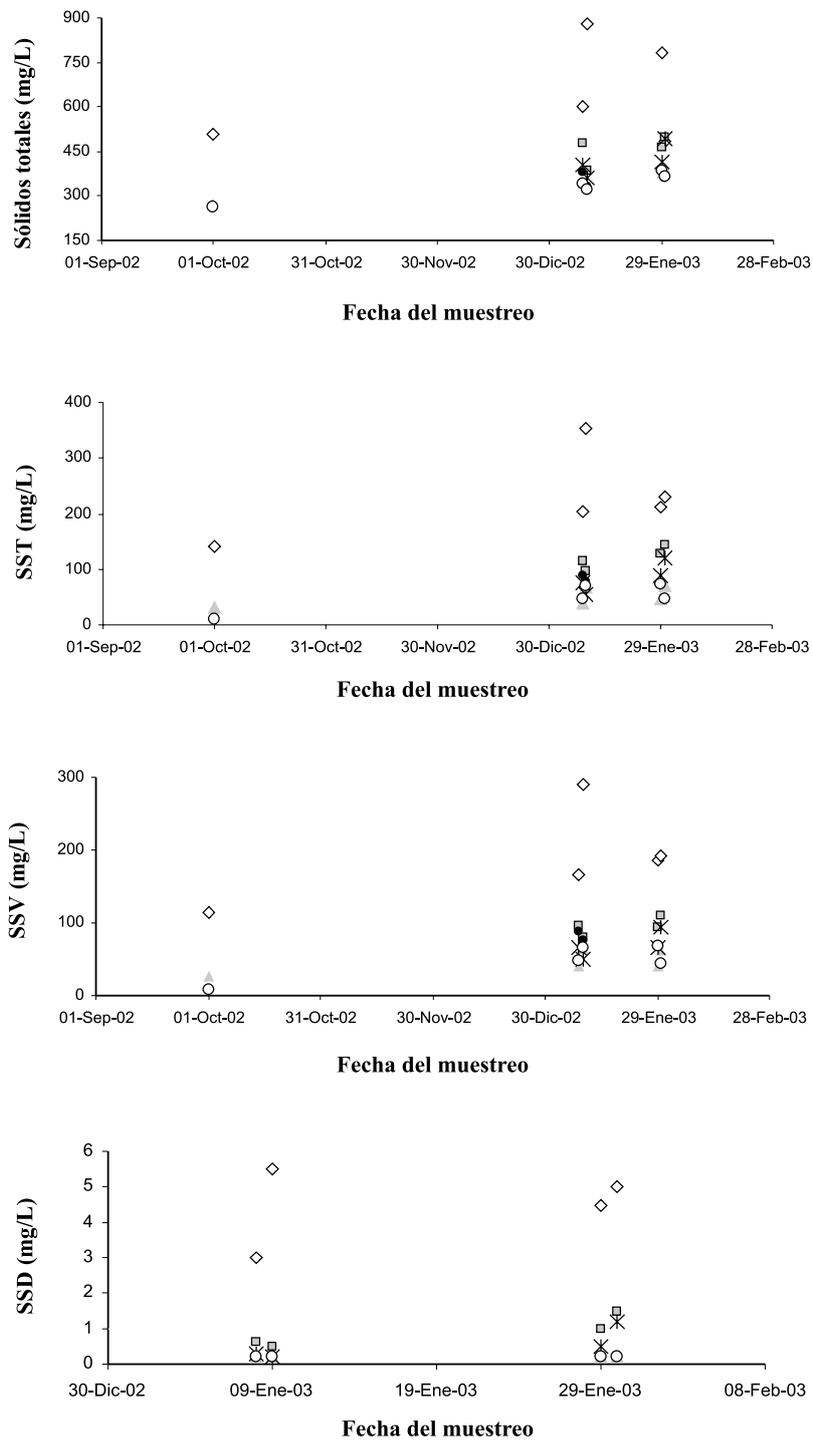


Figura 6 Variación nictemeral los sólidos totales, suspendidos totales, suspendidos volátiles y suspendidos disueltos en el sistema de lagunas de estabilización de las aguas residuales del Municipio de La Ceja, Antioquia durante todos los muestreos

Coliformes totales y fecales. Los resultados de coliformes totales fueron iguales en todos los puntos de muestreo $1,6 \times 10^6$ NMP/100 ml.

Clorofila a. En el premuestreo 1, el color de la laguna facultativa se tornó verde oscuro, lo cual indica una concentración algal alta, mientras que en el segundo premuestreo el color verde de la laguna disminuyó notablemente presentándose

un valor de clorofila a de 190,4 $\mu\text{g/l}$. Lo mismo ocurrió en los nictemerales, obteniéndose una concentración de clorofila “a” baja en el segundo muestreo, 139 $\mu\text{g/l}$.

Análisis de plancton. En la tabla 3 se consignan los resultados obtenidos, en relación con los principales grupos de organismos encontrados en el epilimnio de la laguna facultativa.

Tabla 3 Análisis de plancton muestreos 1 y 2

<i>Especie</i>	<i>Muestreo 1</i>	<i>Muestreo 2</i>
	<i>N.º individuos/ml</i>	<i>N.º individuos/ml</i>
Cryptomonas y Chlamydomonas	260.714	92.177
<i>Oscillatoria</i> sp	12.415	340
Bacteria filamentosa	87.245	12.415
Diatomeas	5.442	-
Oscillatoria planctonica	510	-
Alga cianoficea colonial	170	-
Protozoos	-	170

Análisis de resultados

Velocidad y dirección del viento. La velocidad del viento en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja en promedio registró valores menores de 3 m/s, que no generarían erosión en los taludes internos, cortocircuitos en las lagunas o la salida de sobrenadantes en el efluente de las mismas. Por presentarse velocidades tan bajas de los vientos, no hay un efecto importante del viento sobre mezcla de la columna de agua, es decir, la presencia de los perfiles de temperatura del agua observados no es debida al viento sino a la pérdida de calor en las horas nocturnas.

La dirección diurna del viento fue predominantemente hacia el norte. En las horas de la tarde, el viento fluyó hacia la zona urbana del municipio de La Ceja. En general, y durante los períodos cortos de muestreos, los vientos predominaron

desde la salida de las lagunas hacia sus canales influentes.

Intensidad de la luz. Las intensidades de la luz netas registradas en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja, durante los periodos de muestreo, superan en la mayor parte del día la intensidad neta, que según [3] afecta el crecimiento de algunas algas, 200.000 $\text{erg/cm}^2 \text{seg}$, aunque se debe considerar que éstas no se obtuvieron bajo las condiciones climáticas más desfavorables, por el contrario fueron registradas en época seca.

Caudal. El comportamiento de las aguas residuales domésticas en el municipio de La Ceja durante el verano no es altamente variable y no se presentaron altos picos de consumo a determinadas horas. Se observó que los caudales más altos se registraron al medio día.

Temperatura del aire y del agua. La variación día-noche de la temperatura del agua mostró diferencias entre 4,7 y 6,7 °C en el ciclo nictemeral, tanto para las lagunas anaerobias como para la facultativa. La tendencia general de la temperatura en la columna de agua en las tres lagunas fue similar. Se presentaron perfiles decrecientes hacia el fondo en las horas de la mañana y la tarde, y crecientes en las horas de la noche y la madrugada. Esto es debido a la fuerte actividad anaerobia que se presenta en el fondo y manteniendo el agua de fondo con mayor temperatura. En el día la temperatura del aire alcanzó valores altos (27 °C) que mantienen la superficie del agua más caliente, en tanto en la noche la temperatura del aire baja hasta los 15 °C. Lo anterior incidió sobre la pérdida de calor en el cuerpo de agua en la noche y en consecuencia generó polimixis de las lagunas.

Oxígeno disuelto y CO₂. En la columna de agua la tendencia general fue homogénea con ligeras variaciones descendentes, ya que a medida que se desciende en la columna de agua hay menos disponibilidad de oxígeno por la intensa actividad anaerobia. Se presentaron ligeras variaciones en algunas mediciones, valores mayores del oxígeno disuelto, que pueden atribuirse a reaireación en el momento de la toma de muestra. Aunque el rango de valores fue estrecho, los mayores niveles de oxígeno disuelto se mostraron en las horas de la mañana y los menores en la noche. En la laguna facultativa se presentaron esporádicos incrementos del CO₂ en las horas de la mañana. Durante el resto del muestreo la laguna presentó condiciones anaerobias mostrando concentraciones de oxígeno muy similares a las lagunas anaerobias al igual que su comportamiento en los tres puntos de la columna de agua.

El comportamiento del CO₂ en el segundo muestreo se observó un incremento con la profundidad tanto en las lagunas anaerobias como en la laguna facultativa. Aunque los valores registrados de CO₂ fueron altos, el pH de las lagunas anaerobias siempre fue neutro y ligeramente alcalino en la laguna facultativa.

pH. El pH del agua residual cruda del municipio de La Ceja varió entre 6,5 y 7,8 en todos los muestreos, correspondientes con valores típicos para aguas residuales domésticas. En la entrada de la laguna anaerobia 1 los registros de pH oscilaron siempre entre valores óptimos cercanos a 7,0 al igual que en la laguna anaerobia 2 en todos los muestreos. En la columna de agua no se registraron variaciones significativas del pH conservándose siempre una distribución homogénea de esta variable con la profundidad.

Conductividad eléctrica. En la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja, la conductividad eléctrica del agua residual cruda fue elevada pudiéndose observar que hay una alta concentración de sólidos disueltos debida a la gran cantidad de materia orgánica. En las lagunas anaerobias la variación de la conductividad eléctrica en la columna de agua puede atribuirse a la mezcla que se da en las lagunas. La alta concentración detectada en el fondo, se debe a la gran cantidad de sedimentos que se depositan por la descomposición de la materia orgánica. Lo mismo sucedió en la laguna facultativa, la cual tuvo un comportamiento similar a las lagunas anaerobias en la columna de agua, ya que al interior de ella, se presentó mezcla completa nocturna.

Nutrientes. Para las aguas residuales domésticas del municipio de La Ceja los valores promedio de fósforo total soluble y nitrógeno total soluble, fueron 7,19 y 42,22 mg/l respectivamente, valores que se encuentran dentro de los rangos típicos para este tipo de aguas (4 a 15 mg/l para el fósforo y de 20 a 85 mg/l para el nitrógeno).

DQO y DBO₅. El valor promedio de la DQO del agua residual cruda encontrado durante los muestreos realizados en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Ceja fue 608,57 mg/l, valor típico de aguas residuales domésticas, el cual debe estar en un rango de 250 a 1.000 mg/l. La remoción de DQO en el sistema fue de aproximadamente 70% durante todos los muestreos.

Para el agua residual cruda, el valor promedio obtenido de DBO₅ fue 367,54 mg/l. Esta variable

se halló dentro del rango típico para aguas residuales domésticas (110 a 400 mg/l), encontrándose dentro del rango de concentración fuerte al igual que la DQO.

En el municipio de La Ceja, las lagunas anaerobias poseen un tiempo de retención hidráulica, bajo las condiciones actuales de operación obtenidas durante el proyecto, de 4,11 y 4,48 días respectivamente para las lagunas anaerobias 1 y 2; cargas volumétricas de 89,43 y 82,04 g DBO₅/m³ día y cargas orgánicas superficiales de 1.922,7 y 1.944,3 kg DBO₅/ha día. De lo anterior se puede deducir que las cargas volumétricas de las lagunas anaerobias se encuentran bajas mientras que las cargas superficiales se encuentran dentro de los intervalos que la literatura señala como adecuados para garantizar el buen funcionamiento de las lagunas de estabilización.

En el caso de la laguna facultativa del municipio de La Ceja, la carga orgánica superficial, calculada con la concentración obtenida en el muestreo y condiciones actuales de operación, fue 683,2 kg DBO₅ /ha día la cual influiría notablemente en la disminución de los niveles de clorofila "a", ya que este valor supera el rango recomendado por la OMS para climas tropicales de 200 a 400 kg DBO₅ /ha día.

Sólidos. Para el caso de las aguas residuales del municipio de La Ceja, las concentraciones promedio de sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles y sólidos sedimentables fueron 651,2, 227,9 y 190,34 y 4,5 ml/l.

En el efluente de la laguna facultativa, se observaron remociones promedio altas tanto de los sólidos totales, como de los suspendidos totales y los sólidos suspendidos volátiles, alrededor todas del 80%. La concentración de sólidos suspendidos volátiles fue cerca del 85% del valor promedio de la concentración de sólidos suspendidos totales, o sea, que la mayor parte de éstos se compone de materia orgánica en aproximadamente el 50% [3].

En cuanto a los sólidos sedimentables, el agua residual cruda del municipio presenta un valor

de 4,5 ml/l, el cual está por debajo del rango reportado por la literatura, 5 a 20 ml/l [2]. En los demás puntos de muestreo, los valores de sólidos sedimentables fueron inferiores a los 0,9 ml/l.

Grasas y aceites. El contenido promedio de grasas y aceites de las aguas residuales crudas del municipio de La Ceja, registrado en la entrada al sistema, fue de 120 mg/l, valor que se encuentra dentro del rango típico para aguas residuales reportado por la literatura, 50 a 150 mg/l [2]. El porcentaje de remoción promedio de grasas y aceites en la planta de tratamiento del municipio de La Ceja, es del 72%.

Análisis microbiológico

Microbiología. Las concentraciones obtenidas en el sistema de lagunas de estabilización del municipio de La Ceja, fueron iguales, $1,6 \times 10^6$ NMP/100 ml, tanto en la entrada del sistema, en el efluente de las lagunas anaerobias como en el efluente de la laguna facultativa durante todo el proyecto. Estos resultados pueden asociarse a que el sistema cuenta sólo con las dos primeras etapas de un esquema de este tipo, el cual necesita probablemente dos o más lagunas de maduración después de la laguna facultativa para obtener un efluente de alta calidad microbiológica. Además, se requiere que en total el tiempo de detención esté entre cinco y ocho días y la laguna facultativa tiene un tiempo de detención muy bajo, 2,2 días, tiempo que no proporciona las condiciones necesarias para que se produzca la calidad del efluente esperado.

Clorofila a. Tanto en el segundo muestreo como el segundo muestreo, las concentraciones de clorofila a estuvieron por debajo del rango de concentración que proporciona un funcionamiento satisfactorio de las lagunas facultativas, 1.000 a 3.000 µg/l. La carga superficial en la laguna facultativa fue superior a los 320 kg/ha día, afectando el crecimiento de las algas y ocasionando una reducción en la clorofila a.

Análisis de plancton. Las especies de microorganismos encontrados en los dos muestreos en

el análisis de plancton son de vida corta, lo que quiere decir que por las condiciones que tiene la laguna, ésta no proporciona posibilidades de supervivencia mayores. En este aspecto podría influir el tiempo de retención hidráulica, 1,1 días.

Conclusiones

Los valores de temperatura del agua, oxígeno disuelto, CO₂, pH, DQO, DBO₅, nutrientes, las diferentes formas de sólidos, las grasas y aceites, y los coliformes totales y fecales obtenidos durante el periodo de muestreo, estuvieron siempre dentro de los rangos establecidos de valores típicos para aguas residuales domésticas en el trópico.

La velocidad del viento no presentó valores elevados que pudieran generar mezcla en las lagunas. La dirección del viento predominante fue opuesta al flujo en las lagunas evitándose así sobrenadantes en el efluente del sistema.

La cantidad de radiación registrada durante la fase experimental del proyecto mostró siempre valores adecuados para propiciar el crecimiento y metabolismo de los microorganismos.

El caudal promedio registrado en la entrada al sistema fue durante el periodo de muestreo igual al 50% del caudal de diseño.

La temperatura mostró variaciones nictemerales presentándose un calentamiento de la superficie del agua durante el día con perfiles clinógrafos y una pérdida de calor en la noche, evidenciándose un leve incremento con la profundidad en la noche.

En las lagunas anaerobias, el oxígeno disuelto presentó valores cercanos a cero como era de esperarse sin registrarse una variación nictemeral significativa. El CO₂ fue alto en las lagunas anaerobias como en la laguna facultativa. El pH presentó valores neutros tanto en la entrada como en las lagunas anaerobias durante toda la fase de muestreo. La laguna facultativa mostró valores de pH ligeramente alcalinos, este hecho evidencia la

poca actividad fotosintética en el sistema durante el día. No se observó variación nictemeral significativa tanto en las lagunas anaerobias como en la laguna facultativa.

La remoción promedio de nitrógeno fue del 36%. La concentración de nitratos en el efluente fue baja lo que indica que el proceso de oxidación del nitrógeno no se da completamente, lo que limita una de las formas biodisponibles de nitrógeno para los microorganismos presentes en el cuerpo de agua.

La remoción de fósforo del sistema fue en promedio del 24%. En el efluente de la laguna facultativa, un alto porcentaje de la concentración de fósforo se halló en forma de fosfatos, lo que indica que se encuentra en su forma biodisponible, pero su concentración fue superior al nitrógeno.

Las concentraciones de DQO y DBO₅ en el efluente fueron en promedio 198,84 y 79,12 mg/l. La eficiencia del sistema fue en promedio del 78%.

La remoción de sólidos en el sistema, fue en promedio, cercana al 80%. Los valores encontrados para las diferentes formas de sólidos analizadas, se encontraron dentro de los valores típicos registrados en la literatura para este tipo de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Las grasas y aceites tuvieron una remoción en promedio del 72% y la concentración del efluente fue 34,4 mg/l.

Las cantidades de coliformes totales fueron iguales tanto en la entrada como en los efluentes de las lagunas anaerobias y la facultativa. La remoción de coliformes totales en la laguna facultativa se lograría sólo si esta tuviera un tiempo de retención hidráulica mayor a 5 días.

La concentración de clorofila "a" en la laguna facultativa presentó valores muy bajos con relación a los típicos encontrados en estos sistemas como consecuencia de la alta carga orgánica superficial. Lo anterior, está asociado a su corto tiempo de retención hidráulica. En ambos muestreos no se estableció una comunidad planctónica lo sufi-

cientemente estable que favorezca los procesos de transferencia de la materia orgánica y los nutrientes disueltos en nueva biomasa. Esto tiene como consecuencia la alteración del metabolismo al interior del sistema y la disminución en la eficiencia del mismo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo a las siguientes entidades: Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental-Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental —GAIA—, Universidad de Antioquia; Empresas Públicas de La Ceja; Cornare.

Referencias

1. Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering*. United States. McGraw-Hill. 1972. pp. 1-11.
2. Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering*. United States. McGraw-Hill. 1972. pp. 582-598.
3. M. S. Rolim. *Sistemas de lagunas de estabilización*. Colombia. McGraw-Hill. 2000. pp. 198-206.
4. R. Sáenz. *Predicción de la calidad del efluente en las lagunas de estabilización*. Lima. CEPIS. 1987. (Hojas de divulgación técnica 38).
5. Saneambiente Ltda. *Rediseño de interceptores y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas para el área urbana del municipio de La Ceja, Antioquia*. Medellín. 1996. pp. 74-75.
6. APHA-AWWA-WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid. Editorial Díaz de Santos. 1992. pp. 1-1, 10-207.
7. R. Wetzel, G. Likens. *Limnological Analyses*. New York. Third Edition. Springer Verlag. 2000. pp. 163-172.