

Uso de la AUV_{254} como sustituto de la DBO para evaluar lagunas de estabilización

Fabio Leonardo Mesa Ramírez* y Jairo Alberto Romero Rojas**

El propósito de este artículo es evaluar la utilidad del ensayo de absorbancia de luz ultravioleta a 254 nm, AUV_{254} , como sustituto del ensayo convencional de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) para cuantificar la calidad orgánica del agua residual y, por tanto, la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se recogieron muestras de aguas residuales, durante diez semanas, para su caracterización y para complementar la investigación hecha en el año 2004⁽²⁾. El ensayo de AUV_{254} es representativo de la calidad orgánica del agua residual y permite, de manera rápida y sencilla, evaluar el sistema de tratamiento.

Palabras claves: AUV_{254} ; DBO; lagunas de estabilización; aguas residuales.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en las lagunas de estabilización es un requisito necesario para conocer los parámetros de diseño de dichos sistemas y para controlar su rendimiento. Sin embargo, se requieren cinco días para obtener su valor y, además, es un ensayo que debe realizarse repetidamente para obtener resultados aceptables. La factibilidad de utilizar AUV_{254} como parámetro sustitutivo de la DBO constituye un objetivo principal en la evaluación de la contaminación orgánica por métodos sencillos, más rápidos y más económicos^(1,2).

Algunos componentes orgánicos comúnmente encontrados en el agua y en aguas residuales como lignina, tanino, sustancias húmicas y varios componentes aromáticos, absorben fuertemente radiación ultravioleta⁽³⁾. La AUV_{254} es un parámetro sustitutivo útil para medir componentes orgánicos de aguas naturales, salinas y residuales. Pueden existir fuertes correlaciones entre la AUV_{254} y el contenido de carbono orgánico, el color, los precursores de trihalometanos y otros subproductos de la desinfección. La ab-

sorción UV también puede emplearse para control de efluentes industriales y para evaluar eficiencia en remoción orgánica.

Los compuestos orgánicos del agua absorben luz UV en proporción a su concentración. Las muestras son filtradas o centrifugadas para controlar las variaciones en la absorción UV causadas por partículas. El ajuste de pH antes de filtrar es opcional. La selección de la longitud de onda es arbitraria. Históricamente, 253,7 nm se ha usado como la longitud de onda estándar; no obstante, un analista experimentado

El ensayo de AUV_{254} es representativo de la calidad orgánica del agua residual y permite, de manera rápida y sencilla, evaluar el sistema de tratamiento.

puede escoger una longitud de onda diferente que minimice las interferencias de compuestos distintos del de interés y maximice la absorción de éste.

Las principales interferencias en la medida de AUV_{254} se deben a las partículas coloidales, a sustancias orgánicas diferentes de la de interés y a compuestos inorgánicos absorbentes de luz UV, principalmente hierro ferroso, nitrato, nitrito y bromuro. Algunos oxidantes y agentes reductores, como el ozono, clorato, clorito, cloraminas y tiosulfato, también absorberán luz UV a 253,7 nm. Muchas aguas naturales y aguas

* Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

** I.C., MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
jromero@escuelaing.edu.co

procesadas en plantas de potabilización están libres de estas interferencias. La AUV, por la materia orgánica, puede variar para valores de pH por debajo de 4 o arriba de 10; para el ensayo se deben evitar estos valores.

Un barrido de AUV entre 200 y 400 nm puede usarse para determinar la presencia de interferencias. Los espectros típicos de absorción de materia orgánica natural son curvas sin características distintivas que aumentan la absorción con el decrecimiento de la longitud de onda. Los picos agudos o irregularidades en la absorción pueden ser indicadores de interferencias inorgánicas o de contaminantes orgánicos inesperados. Como muchos compuestos orgánicos en aguas y aguas sucias (ejemplo: ácidos carboxílicos y carbohidratos) no absorben significativamente luz UV, se debe correlacionar la AUV con el carbono orgánico disuelto o con la Demanda Química de Oxígeno (DQO) soluble. Con todo, dichas correlaciones varían de un agua a otra y entre aguas crudas y aguas tratadas. Además, la oxidación química (ejemplo: ozonización, cloración) de la materia orgánica puede reducir la AUV sin remover la materia orgánica y así puede cambiar las correlaciones. La AUV y las correlaciones con ella son específicas de cada sitio y pueden no ser comparables de una fuente de agua a otra. El ensayo, sin embargo, por su sencillez, representa un sustituto de la DBO y de la DQO que justifica su evaluación.

Se considera Materia Orgánica Natural⁽⁵⁾ (MON) a las sustancias húmicas provenientes del suelo y producidas en aguas naturales mediante procesos químicos y biológicos de descomposición de vegetación y otros materiales orgánicos. Las sustancias húmicas se definen según el método para extraerlas del agua o del suelo y se dividen en ácidos fúlvicos solubles y en ácidos húmicos menos solubles; en aguas naturales predominan los ácidos fúlvicos solubles.

La concentración de MON se expresa por el contenido de Carbono Orgánico Total (COT), el cual se considera igual al Carbono Orgánico Disuelto (COD), más el Carbono Orgánico Particulado (COP). Se define como COD aquel que pasa a través de un filtro de 0,45 µm de poro y COP aquel que es retenido sobre el filtro.

La mayor parte de las aguas subterráneas de Estados Unidos tienen un COD menor de 2 mg/L, aguas oligotróficas de lagos entre 2 y 10 mg C/L, aguas de ríos de montaña entre 1 y 3 mg C/L y aguas de ríos grandes entre 2 y 10 mg C/L. La concentración promedio de COT en aguas crudas de plantas de purificación, en Estados Unidos, es de 4 mg C/L. Existe una correlación directa entre el valor del COT de un agua y su Potencial de Formación de Trihalometanos (PFTHM), dada por la siguiente ecuación⁽²⁾.

$$\text{PFTHM} = 43,78 (\text{COT})^{1,248} \quad (1)$$

Donde:

PFTHM = Potencial de Formación de Trihalometanos.

COT = Carbono Orgánico Total, mg C/L.

La MON absorbe luz UV, por lo que la absorbancia de luz UV a una longitud de onda de 254 nm, AUV₂₅₄, se utiliza como indicador sustitutivo del COT. También se usa como indicador la relación entre la AUV₂₅₄ y la concentración de carbono orgánico, conocida como Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta (AEUV).

$$\text{AEUV} = \frac{\text{AUV}_{254}}{\text{COT}} \quad (2)$$

Donde:

AEUV = Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta, L/mg C cm.

AUV₂₅₄ = Absorbancia de Luz Ultravioleta a 254 nm, cm⁻¹.

COT = Carbono Orgánico Total, mg C/L.

Aguas con una fracción ácida húmica, generalmente con COD bajo, tienden a tener valores de AEUV menores de 2 L/mg C · m, mientras que aguas con fracción ácida húmica alta tienen valores de AEUV entre 3 y 5 L/mg C · m. En la práctica, de acuerdo con la ecuación anterior, aguas con contenido mínimo de COT tienen AUV₂₅₄ menores de 4 m⁻¹ o 0,04 cm⁻¹.

En términos de DBO:

$$\text{AEUV} = \frac{\text{AUV}_{254}}{\text{DBO}} \quad (3)$$

Donde:

AEUV = Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta, L/mg DBO cm.

AUV₂₅₄ = Absorbancia de Luz Ultravioleta a 254 nm, cm⁻¹.

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg O₂/L.

METODOLOGÍA

El sistema de tratamiento utilizado para este estudio es el de las lagunas de estabilización de Chía. La planta de tratamiento posee en la actualidad una estructura de entrada, compuesta por un tanque con aliviadero a la cual llega una tubería de 60 cm de diámetro, con una pendiente del 0,98% que transporta el agua del sector ubicado entre las calles 9 y 21 y las carreras 2 y 11 del municipio de Chía. Además, se conecta una tubería de 70 cm de diámetro que cuenta con una pendiente del 0,1%, que a su vez transporta las aguas residuales de la zona suburbana de la vereda de Bojacá hasta Tres Esquinas y del colector de Centro Chía. Mediante un sistema de derivación (*bypass*), en tubería de 60 cm de diámetro, se pueden descargar las aguas directamente al río Bogotá. Para realizar aforos posee una canaleta Parshall en

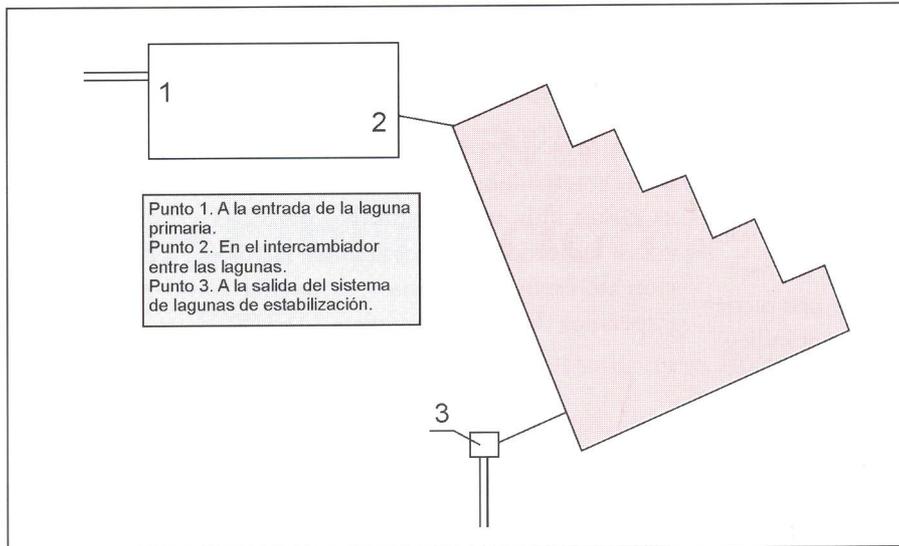


Figura 1. Esquema de las lagunas y puntos de muestreo.

la entrada al sistema, mientras que a la salida del mismo posee un vertedero triangular de 90°. El diseño del sistema de tratamiento contempló la construcción de dos lagunas en serie: la primera anaeróbica y la segunda facultativa. El caudal medio adoptado para el diseño de la planta fue de 100 L/s.

MUESTREO

Se realizó de manera manual en tres puntos del sistema de tratamiento, como se indica en la figura 1.

- Punto 1. Entrada a la laguna primaria.
- Punto 2. En el intercambiador entre lagunas.
- Punto 3. Salida del sistema de lagunas de estabilización.

Se tomaron muestras compuestas de un litro, proporcionales al caudal, a partir de cuatro muestras simples horarias en cada uno de los tres puntos, entre las 8:30 a.m. y las 11:30 a.m., durante diez semanas.

AFORO

Para el aforo se usó la canaleta Parshall ubicada en la unidad de entrada al sistema, y para el caudal efluente el vertedero triangular de 90° de la unidad de salida.

RESULTADOS

Los ensayos de DBO, AUV₂₅₄, OD, pH y temperatura, se hicieron de conformidad con el Standard Methods⁽³⁾.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Método 5210B.
- AUV₂₅₄. Método 5910, sobre muestra centrifugada durante cinco minutos a la máxima velocidad de una máquina IEC Clinical Centrifuge.
- Oxígeno Disuelto (OD). Método 4500-O B.
- Temperatura. Método 2550 B.
- pH. Método 4500 H⁺B.

En las tablas 1 a 10 y en las figuras 2 a 8 se presentan los resultados de la caracterización del agua cruda y de los efluentes primario y secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales, para el período 2005. En la tabla 11 y en las figuras 9 y 10 se incluyen los resultados de DBO, AUV₂₅₄ y AEUV para los años 2004 y 2005.

En la tabla 1 se pueden observar los resultados de oxígeno disuelto. En todos los casos el OD es igual a cero,

Tabla 1
Caracterización del agua residual

Fecha de muestreo	Caudales promedio		Clase	OD (mg/L)	Temperatura promedio (°C)	pH	DBO (mg/L)	AUV ₂₅₄ (cm-1)	AEUV (L/mg DBO cm)
Q _{afluente} (L/s)	Q _{efluente} (L/s)								
Ago-24	135,6	43,1	Cruda	0	17	7,62	199	1,055	0,0053
			Primaria	0	17	6,93	153	0,708	0,0046
			Secundaria	0	17	7,56	78	0,691	0,0089
Ago-31	45,6	43,1	Cruda	0	19	8,05	182	1,593	0,0088
			Primaria	0	19	7,17	120	1,093	0,0091
			Secundaria	0	19	7,54	70	0,732	0,0105
Sep-07	42,2	43,1	Cruda	0	19	7,80	231	1,509	0,0065
			Primaria	0	19	7,11	123	0,983	0,0080
			Secundaria	0	19	7,58	59	0,707	0,0120
Sep-14	38,8	43,1	Cruda	0	19	8,40	234	1,453	0,0062
			Primaria	0	18	7,20	169	1,069	0,0063
			Secundaria	0	17	7,84	57	0,699	0,0123
Sep-21	32,4	38,9	Cruda	0	19	7,76	287	1,579	0,0055
			Primaria	0	20	7,27	135	1,024	0,0076
			Secundaria	0	18	7,42	72	0,857	0,0119
Sep-28	64,2	38,9	Cruda	0	19	8,01	250	1,350	0,0054
			Primaria	0	20	7,24	129	0,724	0,0056
			Secundaria	0	19	7,73	68	0,615	0,0090
Oct-5	42,2	43,1	Cruda	0	19	7,50	223	1,387	0,0062
			Primaria	0	20	7,25	117	0,942	0,0080
			Secundaria	0	19	7,64	56	0,663	0,0118
Oct-12	26,4	43,1	Cruda	0	19	7,60	152	1,295	0,0085
			Primaria	0	20	7,10	108	0,836	0,0077
			Secundaria	0	18	7,26	56	0,754	0,0134
Oct-19	38,8	47,5	Cruda	0	19	7,37	221	1,256	0,0057
			Primaria	0	18	7,13	93	0,834	0,0090
			Secundaria	0	18	7,49	47	0,583	0,0124
Oct-26	64,2	43,1	Cruda	0	19	6,55	191	0,966	0,0051
			Primaria	0	19	6,47	53	0,645	0,0122
			Secundaria	0	18	6,90	42	0,621	0,0148

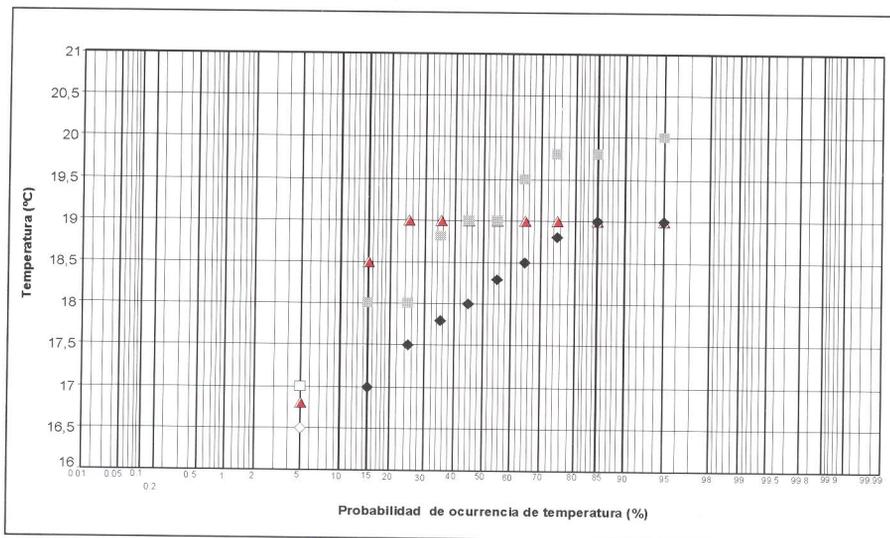


Figura 2. Temperatura del sistema de tratamiento.

Tabla 2
Eficiencias de remoción de DBO del sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	DBO (mg/L)			Eficiencia (%)		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario	Primaria	Secundaria	Total
Ago-24	199	153	78	23	49	61
Ago-31	182	120	70	34	42	62
Sep-7	231	123	59	47	52	74
Sep-14	234	169	57	28	66	76
Sep-21	287	135	72	53	47	75
Sep-28	250	129	68	49	47	73
Oct-5	223	117	56	48	52	75
Oct-12	152	108	56	29	48	63
Oct-19	221	93	47	58	49	79
Oct-26	191	53	42	72	21	78
Promedio	217	120	61	44	47	71
Desv. estándar	38	32	11	15	11	7
Intervalo	152-287	53-169	42-78	23-72	21-66	61-79

Tabla 3
Características de operación de la laguna primaria

Fecha de muestreo 2005	Q _{afluente} (m ³ /d ha d)	DBO (mg/L)	COS (kg DBO/ha·d)	COV (g DBO/m ³ d)	Tiempo de retención (d)
Ago-24	11.716	199	4.302	96	2
Ago-31	3.940	182	1.323	29	6
Sep-7	3.646	231	1.556	35	7
Sep-14	3.352	234	1.447	32	7
Sep-21	2.799	287	1.482	33	9
Sep-28	5.547	250	2.562	57	4
Oct-5	3.646	223	1.500	33	7
Oct-12	2.281	152	641	14	11
Oct-19	3.352	221	1.367	30	7
Oct-26	5.547	191	1.955	43	4
Promedio	4.583	217	1.813	40	6
Desv. estándar	2.717	38	1.000	22	2

por tanto, se corrobora el hecho de que todo el sistema de tratamiento funciona en condiciones anaerobias.

En las tablas 1 y 9, al igual que en la figura 2, se registran los valores de temperatura del agua, en los diferentes puntos de muestreo. Se puede apreciar que la temperatura máxima registrada fue de 20 °C y la mínima de 17 °C.

En la figura 3, como en las tablas 1 y 5, se registran los valores de DBO para el agua cruda, para el efluente primario y para el efluente secundario. Con un 95% de probabilidad se puede afirmar que la DBO del agua cruda es menor de 287 mg/L con un valor promedio de 217 mg/L, la DBO del efluente primario es menor de 169 mg/L, con un valor promedio de 120 mg/L y la DBO del efluente secundario menor de 78 mg/L, con un valor promedio de 61 mg/L.

En la figura 3 se indica que el sistema de tratamiento genera un efluente con concentraciones de DBO menores que el límite establecido por la EPA de 65 mg/L, durante un 66% del tiempo. La DBO promedio del agua cruda es de 217 mg/L, la del efluente primario de 120 mg/L y la del efluente secundario de 61 mg/L. Como se observa en la tabla 2 y en la figura 5, la laguna primaria remueve hasta un 72% de DBO, en promedio un 44%; la laguna secundaria remueve hasta un 66% de DBO, en promedio un 47%, y la eficiencia global de remoción de DBO del sistema es de 61 a 79%, con un valor promedio del 71%. En general, lagunas anaeróbicas con temperaturas entre 11 °C y 20 °C tienen una eficiencia en remoción de DBO del 50%⁽⁴⁾.

En la tabla 3 se muestra como la laguna primaria tiene un tiempo de retención promedio de seis días y una eficiencia promedio de remoción de DBO del 44%. La laguna secundaria tiene un tiempo de retención promedio de 20 días y una eficiencia de remoción de DBO del 47%. El tiempo promedio de retención en las dos lagunas anaerobias es de 26 días, con una eficiencia de remoción promedio en DBO de 71%, valor que puede considerarse típico en tratamiento anaerobio de aguas residuales de baja concentración a bajas temperaturas.

En las tablas 3 y 4 se muestran los valores de las cargas orgánicas de operación de las lagunas primaria y secundaria. La carga orgánica superficial promedio de la laguna primaria, 1.813 kg DBO/ha·d, es una carga orgánica superficial típica de lagunas anaerobias, como era de esperarse. La carga orgánica superficial promedio de la laguna secunda-

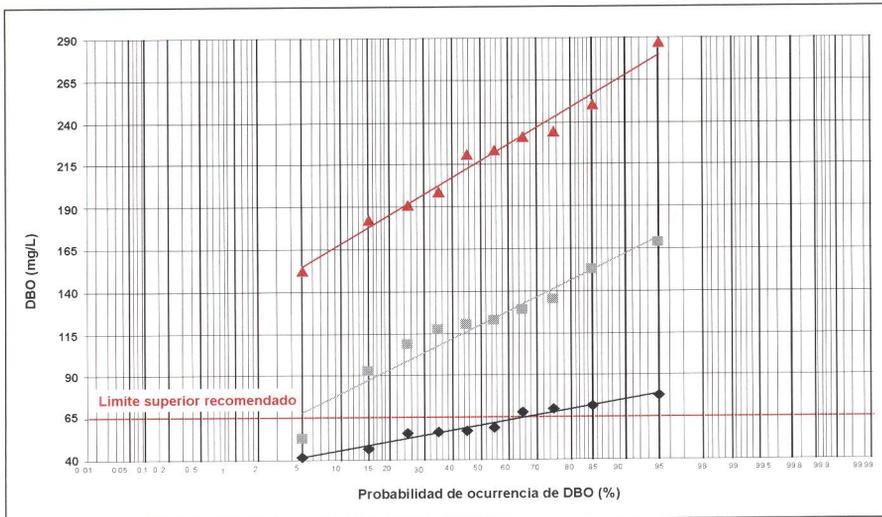


Figura 3. DBO del sistema de tratamiento.

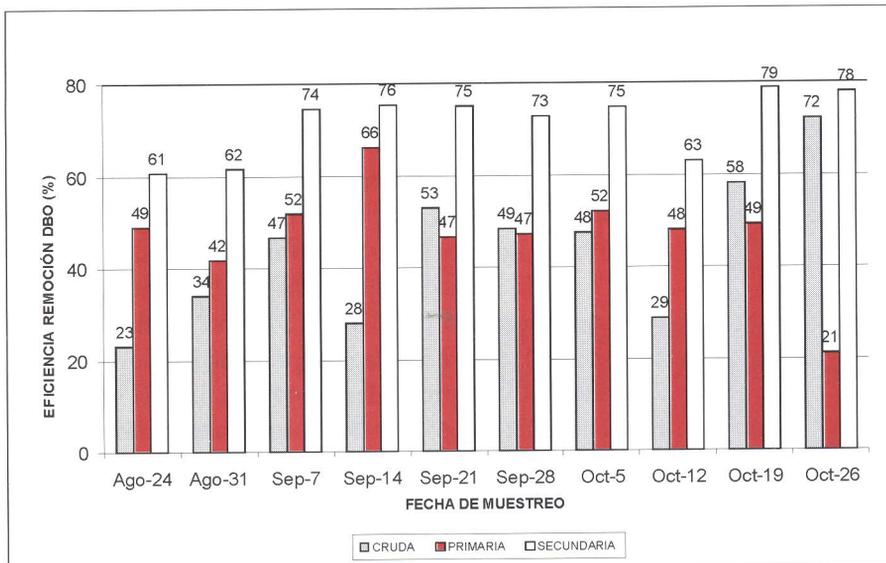


Figura 4. Eficiencia de remoción de DBO del sistema de tratamiento.

Tabla 4
Características de operación de la laguna secundaria.

Fecha de muestreo 2005	Q _{afluente} (m ³ /d)	DBO (mg/L)	COS (kg DBO/ha d)	COV (g DBO/m ³ d)	Tiempo de retención (d)
Ago-24	3.724	153	156	8	20
Ago-31	3.724	120	122	6	20
Sep-7	3.724	123	125	6	20
Sep-14	3.724	169	172	9	20
Sep-21	3.361	135	124	6	22
Sep-28	3.361	129	118	6	22
Oct-5	3.724	117	119	6	20
Oct-12	3.724	108	110	6	20
Oct-19	4.104	93	104	5	18
Oct-26	3.724	53	54	3	20
Promedio	3.689	120	120	6	20
Desv. estándar	210	32	31	2	1

ria, 120 kg DBO/ha·d, no excede la carga típica de diseño de lagunas facultativas para temperaturas de 17 a 20 °C, 200 kg DBO/ha·d según el modelo de Mara o 300 kg DBO/ha·d según el modelo de MacGarry y Pescod, contrariando el estado anaerobio observado. Además, la laguna secundaria exhibe un tiempo de retención de 20 días, y una carga orgánica volumétrica de 6 g DBO/m³ d, aceptables para lagunas facultativas. Se puede presumir que la causa de esta contradicción de operación se debe a pérdida excesiva en el volumen útil de la laguna por acumulación de lodos o sedimentos, o a concentraciones tóxicas de sulfuros, valores superiores de 8 a 10 mg/L-S.⁽⁶⁾, que no permiten el desarrollo de una zona fótica ni el apropiado crecimiento de la población algal.

En la tabla 8 y en la figura 8 se muestran los valores de pH observados en el sistema. Los valores de pH varían entre 6,55 y 8,04 para el agua cruda, con un promedio observado de 7,67; valores típicos de agua residual municipal. El pH del efluente primario oscila entre 6,47 y 7,27, intervalo de pH menor que el del agua cruda, debido probablemente al predominio de la primera etapa de digestión anaerobia o de fermentación ácida. El pH del efluente secundario varía entre 6,90 y 7,84, valores mayores que los del efluente primario, debido posiblemente a la presencia de la segunda etapa de la oxidación anaerobia, con el consecuente consumo de ácidos volátiles producidos en la primera etapa de digestión. Los valores de pH se mantienen en todos los casos dentro del intervalo exigido para vertimientos de aguas residuales.

Los valores observados de AUV₂₅₄ y AEUV se presentan en las tablas 6 y 7, y en las figuras 6 y 7. En dichas tablas y figuras se observa que la AUV₂₅₄ varía entre 0,58 y 1,59 cm⁻¹, valores su-

Tabla 5

DBO observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	Agua cruda	DBO (mg/L)	
		Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	199	153	78
Ago-31	182	120	70
Sep-7	231	123	59
Sep-14	234	169	57
Sep-21	287	135	72
Sep-28	250	129	68
Oct-5	223	117	56
Oct-12	152	108	56
Oct-19	221	93	47
Oct-26	191	53	42
Promedio	217	120	61
Desv. estándar	38	32	11
Intervalo	152 - 287	53 - 169	42 - 78

Tabla 6

AUV₂₅₄ observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	Agua cruda	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	
		Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	1,055	0,708	0,691
Ago-31	1,593	1,093	0,732
Sep-7	1,509	0,983	0,707
Sep-14	1,453	1,069	0,699
Sep-21	1,579	1,024	0,857
Sep-28	1,350	0,724	0,615
Oct-5	1,387	0,942	0,663
Oct-12	1,295	0,836	0,754
Oct-19	1,256	0,834	0,583
Oct-26	0,966	0,645	0,621
Promedio	1,344	0,886	0,692
Desv. estándar	0,209	0,160	0,079
Intervalo	0,966-1,593	0,645-1,093	0,583-0,857

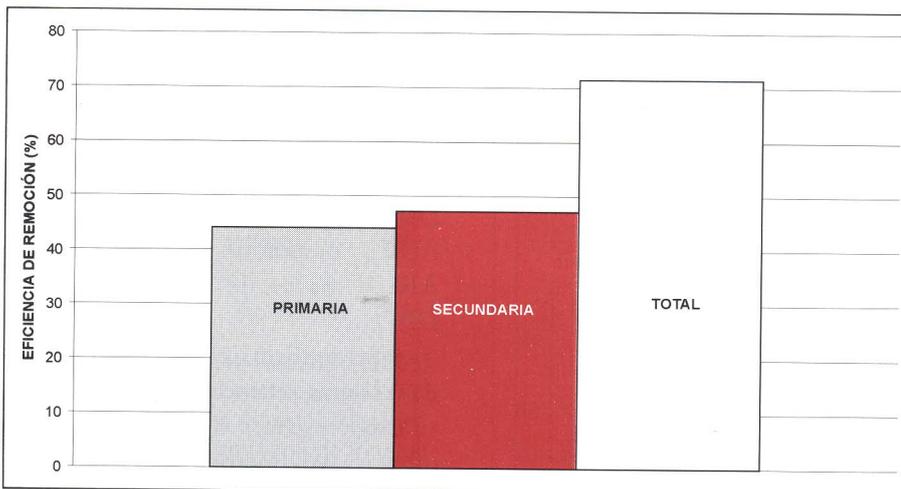


Figura 5. Eficiencias promedio de remoción de DBO del sistema de tratamiento.

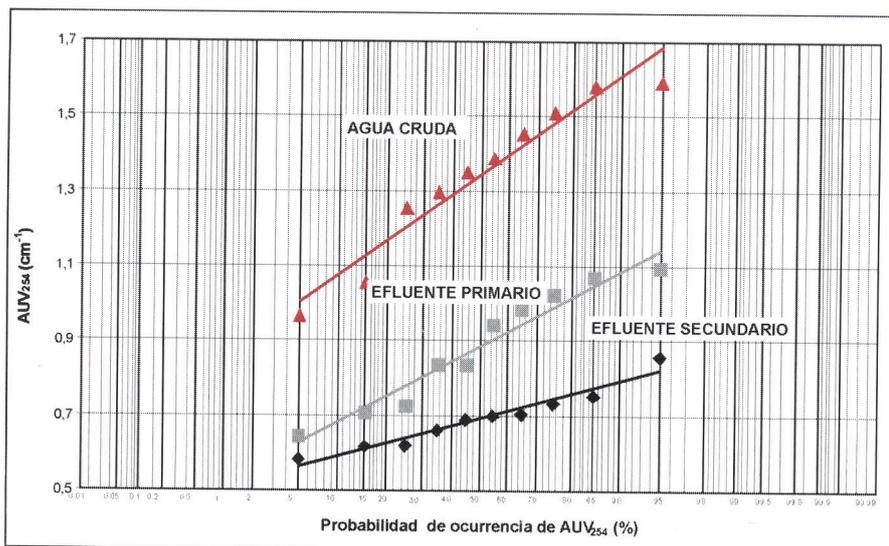


Figura 6. AUV₂₅₄ del sistema de tratamiento.

periores en un factor de 15 a 40 veces el valor de AUV₂₅₄ de 0,04 cm⁻¹ para aguas de buena calidad⁽¹⁾. Como se observa en las figuras 6 y 7, existe una correlación directa entre los valores de AUV₂₅₄ y AEUV para el agua cruda, el efluente primario y el efluente secundario.

En la figura 9 se presenta la correlación observada entre los valores de DBO y AUV₂₅₄ para los años 2004⁽²⁾ y 2005⁽¹⁾, representada por la ecuación 4.

$$DBO = 172,59 AUV_{254} - 49,8 \quad (4)$$

En la figura 10 se presenta la correlación observada entre los valores de DBO y AEUV₂₅₄ para los años 2004⁽²⁾ y 2005⁽¹⁾, representada por la ecuación 5.

$$DBO = -11899AEUV_{254} + 238,02 \quad (5)$$

Donde:

AUV₂₅₄ = Absorbancia de Luz Ultravioleta a 254 nm, cm⁻¹.

AEUV₂₅₄ = Absorbancia Específica de Luz Ultravioleta a 254 nm, L/cm·mg DBO.

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg O₂/L.

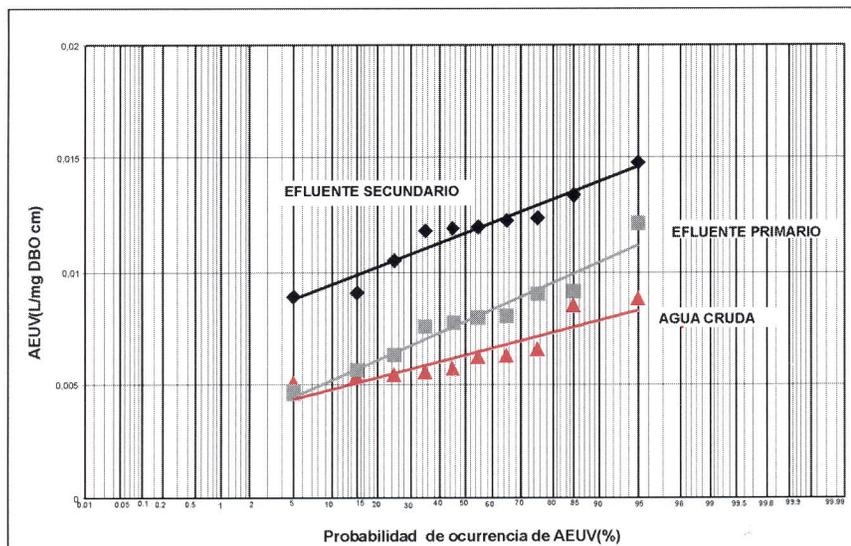


Figura 7. AEUV del sistema de tratamiento.

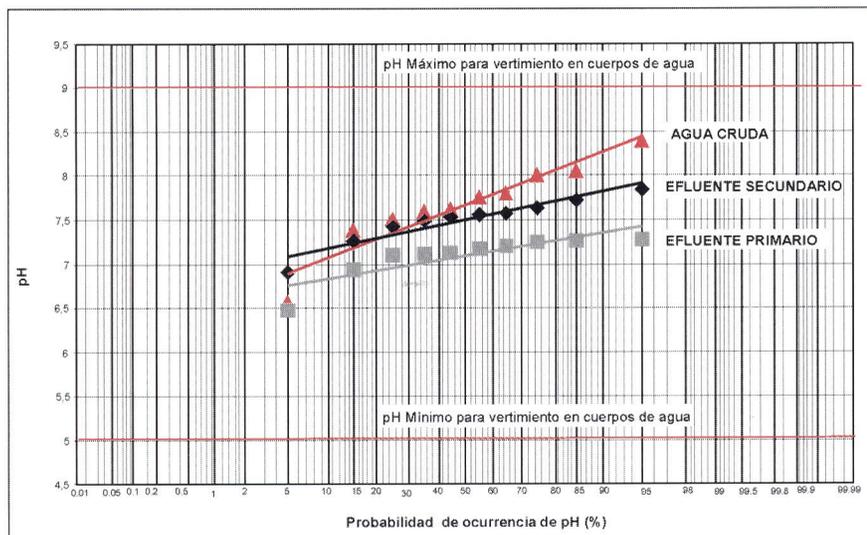


Figura 8. pH del sistema de tratamiento.

Las ecuaciones 4 y 5 indican que para un efluente secundario con DBO < 65 mg/L la AUV_{254} es menor de $0,665 \text{ cm}^{-1}$ y la AEUV es mayor de $0,0145 \text{ L/cm}\cdot\text{mg DBO}$. Para un efluente secundario con DBO < 45 mg/L la AUV_{254} es menor de $0,549 \text{ cm}^{-1}$ y la AEUV es mayor de $0,0162 \text{ L/cm}\cdot\text{mg DBO}$.

CONCLUSIONES

- El nuevo aporte de información⁽¹⁾, agregado a la analizada en el período febrero - mayo de 2004⁽¹⁾, permite establecer una correlación lineal entre la AUV_{254} y la DBO.

- Para un efluente secundario con DBO < 65 mg/L se obtiene una AUV_{254} menor de $0,665 \text{ cm}^{-1}$ y una AEUV mayor de $0,0145 \text{ L/cm}\cdot\text{mg DBO}$.

- Para un efluente secundario con DBO < 45 mg/L se obtiene una AUV_{254} menor de $0,549 \text{ cm}^{-1}$ y una AEUV mayor de $0,0162 \text{ L/cm}\cdot\text{mg DBO}$.

- Se confirma el estado anaerobio de la laguna secundaria, a pesar de que su carga orgánica superficial, su carga orgánica volumétrica y su tiempo de retención son típicos de lagunas facultativas. La laguna secundaria es

Tabla 7

AEUV observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	AEUV (L/mg DBO cm)		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	0,0053	0,0046	0,0089
Ago-31	0,0088	0,0091	0,0105
Sep-7	0,0065	0,0080	0,0120
Sep-14	0,0062	0,0063	0,0123
Sep-21	0,0055	0,0076	0,0119
Sep-28	0,0054	0,0056	0,0090
Oct-5	0,0062	0,0080	0,0118
Oct-12	0,0085	0,0077	0,0134
Oct-19	0,0057	0,0090	0,0124
Oct-26	0,0051	0,0122	0,0148
Promedio	0,0063	0,0078	0,0117
Desv. estándar	0,0013	0,0021	0,0018
Intervalo	0,0051-0,0088	0,0046-0,0122	0,0089-0,0148

Tabla 8

pH observado en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2005	pH		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	7,62	6,93	7,56
Ago-31	8,05	7,17	7,54
Sep-7	7,80	7,11	7,58
Sep-14	8,40	7,20	7,84
Sep-21	7,76	7,27	7,42
Sep-28	8,01	7,24	7,73
Oct-5	7,50	7,25	7,64
Oct-12	7,60	7,10	7,26
Oct-19	7,37	7,13	7,49
Oct-26	6,55	6,47	6,90
Promedio	7,67	7,09	7,50
Desv. estándar	0,49	0,24	0,26
Intervalo	6,55 - 8,40	6,47 - 7,27	6,90 - 7,84

anaerobia debido probablemente a la presencia de concentraciones tóxicas de sulfuro, las cuales impiden el crecimiento de algas y, por ende, la producción de oxígeno en ella.

- La remoción promedio de DBO en la laguna primaria y en la secundaria es de 44 y 47%, respectivamente; valores que pueden considerarse aceptables para sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales frías de baja concentración.

- La eficiencia global de remoción de DBO del sistema de tratamiento es del 71%.

- La calidad del efluente secundario cumple con los parámetros de pH y temperatura para vertimientos sobre cuerpos de agua, estipulados en el Decreto 1594 de 1984.

- El 66% del tiempo, la DBO del efluente final es menor que 65 mg/L, valor aceptado por la Usepa para este tipo de sistema de tratamiento.

REFERENCIAS

1. Mesa Ramírez, Fabio Leonardo (2005). "Uso de AUV₂₅₄ como sustituto de la DBO para evaluar lagunas de estabilización". Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, diciembre.
2. Ayala P., Gloria Andrea & Gelvis L., Jonathan Alexander (2004). "Remoción de materia orgánica en un sistema de tratamiento de lagunas de estabilización". Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, mayo.
3. APHA, AWWA, WEF (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed.
4. Romero Rojas, Jairo Alberto (2005). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
5. Romero Rojas, Jairo Alberto (2002). *Calidad del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, noviembre.
6. Romero Rojas, Jairo Alberto (2005). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, junio.

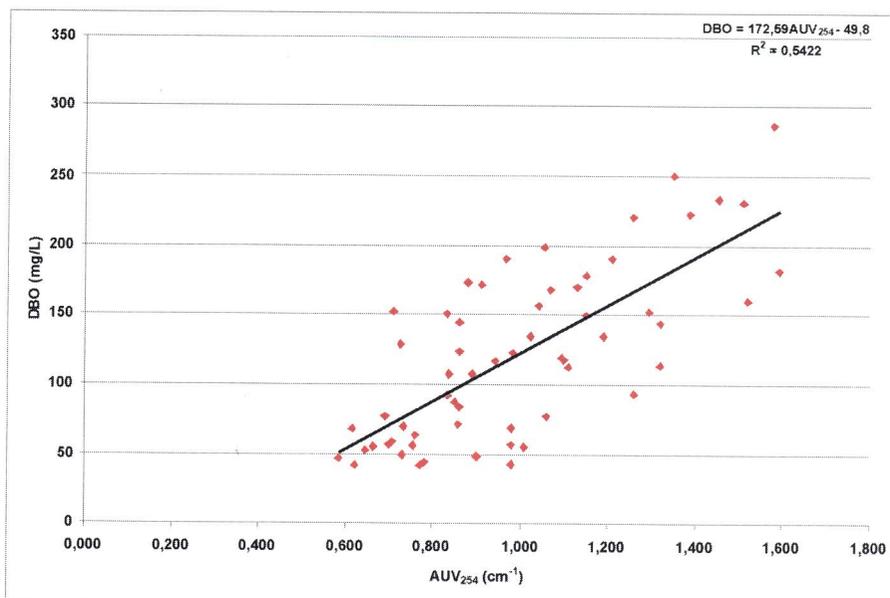


Figura 9. Correlación entre DBO y AUV₂₅₄ (2004-2005).

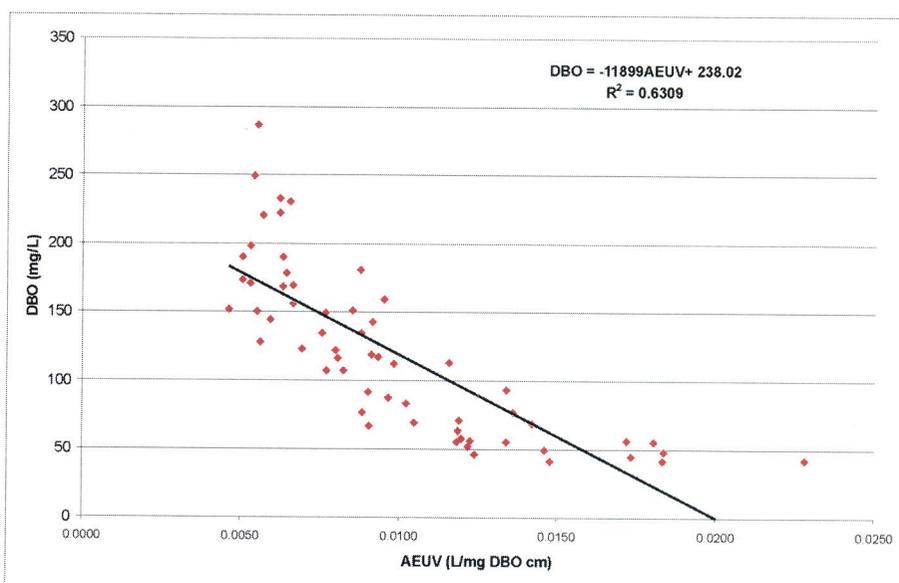


Figura 10. Correlación entre DBO y AEUV (2004-2005).

Tabla 9
Temperatura observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo	Temperatura		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Ago-24	17	17	17
Ago-31	19	19	19
Sep-7	19	19	19
Sep-14	19	18	17
Sep-21	19	20	18
Sep-28	19	20	19
Oct-5	19	20	19
Oct-12	19	20	18
Oct-19	19	18	18
Oct-26	19	19	18
Promedio	19	19	18
Desv. Estándar	1	1	1
Intervalo	17 - 19	17 - 20	17 - 19

Tabla 10
Intervalos de DBO, AUV_{254} y AEUV en el sistema de tratamiento

Muestra	DBO (mg/L)	AUV_{254} (cm ⁻¹)	AEUV (L/mg DBO cm)
A. Cruda	152 - 287	0,966 - 1,593	0,0051 - 0,0088
E. Primario	53 - 169	0,645 - 1,093	0,0046 - 0,0122
E. Secundario	42 - 78	0,583 - 0,857	0,0089 - 0,0148
Global	42 - 287	0,583 - 1,593	0,0051 - 0,0148

Tabla 11
DBO, AUV_{254} y AEUV del sistema de tratamiento (2004-2005)

DBO (mg/L)	AUV_{254} (cm ⁻¹)	AEUV L/mg DBO cm	DBO (mg/L)	AUV_{254} (cm ⁻¹)	AEUV L/mg DBO cm
199	1,055	0,0053	191	0,966	0,0051
153	0,708	0,0046	53	0,645	0,0122
78	0,691	0,0089	42	0,621	0,0148
182	1,593	0,0088	160	1,52	0,0095
120	1,093	0,0091	94	1,26	0,0134
70	0,732	0,0105	43	0,98	0,0228
231	1,509	0,0065	135	1,19	0,0088
123	0,983	0,0080	114	1,32	0,0116
59	0,707	0,0120	78	1,06	0,0136
234	1,453	0,0062	191	1,21	0,0063
169	1,069	0,0063	144	1,32	0,0092
57	0,699	0,0123	56	1,01	0,0180
287	1,579	0,0055	157	1,04	0,0066
135	1,024	0,0076	118	1,1	0,0093
72	0,857	0,0119	57	0,98	0,0172
250	1,350	0,0054	170	1,13	0,0066
129	0,724	0,0056	150	1,15	0,0077
68	0,615	0,0090	49	0,9	0,0184
223	1,387	0,0062	179	1,15	0,0064
117	0,942	0,0080	113	1,11	0,0098
56	0,663	0,0118	69	0,98	0,0142
152	1,295	0,0085	145	0,86	0,0059
108	0,836	0,0077	124	0,86	0,0069
56	0,754	0,0134	64	0,76	0,0119
221	1,256	0,0057	151	0,83	0,0055
93	0,834	0,0090	88	0,85	0,0097
47	0,583	0,0124	50	0,73	0,0146
45	0,78	0,0173	172	0,91	0,0053
174	0,88	0,0051	84	0,86	0,0102
108	0,89	0,0082	42	0,77	0,0183