

Comparison of in Batch Aerobic and Anaerobic Processes for the Degradation of Organic Matter in a Tropical Reservoir

Johanna-Elvira Rodríguez-Ballesteros; Diana-Catalina Rodríguez-Loaiza; Gustavo-Antonio Peñuela-Mesa

Citación: J.-E. Rodríguez-Ballesteros, D.-C. Rodríguez-Loaiza, and G.-A. Peñuela-Mesa, “Comparison of in Batch Aerobic and Anaerobic Processes for the Degradation of Organic Matter in a Tropical Reservoir,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e10892, 2020.
<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10892>

Recibido: Abril 21, 2020; **Aceptado:** Junio 21, 2020;
Publicado: Junio 30, 2020

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Comparison of in Batch Aerobic and Anaerobic Processes for the Degradation of Organic Matter in a Tropical Reservoir

Johanna-Elvira Rodríguez-Ballesteros¹

Diana-Catalina Rodríguez-Loaiza²

Gustavo Antonio Peñuela-Mesa³

Abstract

The decomposition of submerged organic matter after the flooding process of a reservoir and the organic matter transported by the tributaries that supply it, gives rise to the formation of greenhouse gases (GHG), such as CO₂ and CH₄, product of the aerobic and anaerobic biological processes that take place both on the surface and at the bottom of the reservoir. In this study, the dynamics of aerobic and anaerobic processes as well as the generation of greenhouse gases in the degradation of organic matter, present in a tropical reservoir, were compared. Batch reactors and plant material extracted from the protection strip were used. Likewise, the behavior of the variation of the COD, physicochemical parameters such as pH, dissolved oxygen, redox potential, and conductivity were evaluated, and the kinetic constants that represent the behavior of organic matter were defined. The results showed that the degradation of the organic material leads to the generation of GHG, however, when using water plus vegetal material, the GHG increased considerably after a time. This process is due to the fact that the plant material suffers the breakdown of its polymer chains and so it degrades more quickly, which increases

¹ Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga-Santander, Colombia). ORCID: [0000-0001-5479-908X](https://orcid.org/0000-0001-5479-908X)

² Ph. D. Universidad de Antioquia (Medellín-Antioquia, Colombia). diana.rodriquez@udea.edu.co. ORCID: [0000-0002-9310-6925](https://orcid.org/0000-0002-9310-6925)

³ Ph. D. Universidad de Antioquia (Medellín-Antioquia, Colombia). gustavo.penuela@udea.edu.co. ORCID: [0000-0003-3065-0285](https://orcid.org/0000-0003-3065-0285)

the concentration of organic matter available to microorganisms. GHG values were on average 10.290 g CO_{2eq}/m².d with water only, and 24.536 g CO_{2eq}/m².d with water and vegetal material for aerobic processes. In anaerobic processes, the values were on average 12.056 g CO_{2eq}/m².d with water only, and 33.470 g CO_{2eq}/m².d with water plus vegetal material. These laboratory scale results allow analyzing the behavior of the reservoir and the incidence of flooded plant material on GHGs.

Keywords: biological processes; discontinuous; greenhouse effect; organic matter.

Comparación de procesos aerobios y anaerobios en batch para la degradación de la materia orgánica en un embalse tropical

Resumen

La descomposición de la materia orgánica sumergida posterior al proceso de inundación de un embalse y la materia orgánica transportada por los tributarios que surten éste, da lugar a la formación de gases de efecto invernadero (GEI) como el CO₂ y CH₄, producto de los procesos biológicos aerobios y anaerobios que se llevan a cabo tanto en la superficie como en el fondo. En este estudio se comparó la dinámica de los procesos aerobios y anaerobios, y la generación de gases de efecto invernadero en la degradación de la materia orgánica presente en el agua de un embalse tropical, empleando reactores en batch y material vegetal extraído de la franja de protección de este. Asimismo, se evaluó el comportamiento de la variación de la DQO, parámetros fisicoquímicos como el pH, oxígeno disuelto, potencial redox y conductividad, y se definieron las constantes cinéticas que representan el comportamiento de la materia orgánica. Los resultados demostraron que la degradación del material orgánico da lugar a la generación de GEI, sin embargo, al emplear agua más material vegetal, los GEI aumentaron considerablemente después de un tiempo, proceso que se debe a que el material vegetal sufre el rompimiento de sus cadenas poliméricas y se puede degradar más rápidamente, lo que incrementa la concentración de materia orgánica disponible para los microorganismos. Los valores de GEI fueron en promedio de 10.290 g CO_{2eq}/m².d solo con agua y 24.536 g CO_{2eq}/m².d con agua y material vegetal para los procesos aerobios, mientras que en los procesos anaerobios fueron en promedio de 12.056

g CO_{2eq}/m².d solo con agua y 33.470 g CO_{2eq}/m².d con agua más material vegetal. Estos resultados a escala de laboratorio permiten analizar el comportamiento del embalse y la incidencia que tiene el material vegetal inundado sobre los GEI.

Palabras clave: discontinuo; efecto invernadero; materia orgánica; procesos biológicos.

Comparação de processos aeróbios e anaeróbios em batch para a degradação da matéria orgânica em uma barragem tropical

Resumo

A decomposição da matéria orgânica submergida posterior ao processo de inundação de uma barragem e a matéria orgânica transportada pelos tributários que a surtem, dá lugar à formação de gases de efeito estufa (GEI) como o CO₂ e CH₄, produto dos processos biológicos aeróbios e anaeróbios que se levam a cabo tanto na superfície como no fundo. Neste estudo comparou-se a dinâmica dos processos aeróbios e anaeróbios, e a geração de gases de efeito estufa na degradação da matéria orgânica presente na água de uma barragem tropical, empregando reatores em batch e material vegetal extraído da faixa de proteção deste. Assim mesmo, avaliou-se o comportamento da variação da DQO, parâmetros físico-químicos como o pH, oxigênio dissolvido, potencial redox e condutividade, e definiram-se as constantes cinéticas que representam o comportamento da matéria orgânica. Os resultados demonstraram que a degradação do material orgânico dá lugar à geração de GEI, porém, ao empregar água mais material vegetal, os GEI aumentaram consideravelmente depois de um tempo, processo que se deve a que o material vegetal sofre o rompimento de suas cadeias poliméricas e pode-se degradar mais rapidamente, o que incrementa a concentração de matéria orgânica disponível para os microrganismos. Os valores de GEI foram em média de 10.290 g CO_{2eq}/m².d só com água e 24.536 g CO_{2eq}/m².d com água e material vegetal para os processos aeróbios, enquanto que nos processos anaeróbios foram em média de 12.056 g CO_{2eq}/m².d só com água e 33.470 g CO_{2eq}/m².d com água mais material vegetal. Estes resultados a escala de laboratório permitem analisar o

comportamento da barragem e a incidência que tem o material vegetal inundado sobre os GEI.

Palavras chave: descontínuo; efeito estufa; matéria orgânica; processos biológicos.

I. INTRODUCCIÓN

Los gases de efecto invernadero (GEI) son un problema de gran importancia ya que dan lugar al cambio climático, lo que afecta directamente la sociedad [1] y conlleva a problemas de sequías o inundaciones [2], por tal motivo es fundamental el estudio de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido de nitrógeno (N_2O), los cuales son liberados al ambiente bien sea de forma natural o antropogénica [3]. Las concentraciones de GEI en la atmósfera generan una alteración en el sistema climático terrestre, bien sea provocando un aumento o descenso en la temperatura superficial terrestre [4].

Un embalse es definido como una gran masa de agua que cubre una superficie terrestre, la cual ha sido modificada ya sea para producir hidroelectricidad, para el abastecimiento de agua potable, para riego en la agricultura, entre otros fines [5].

En la formación y emisión de los GEI, una de las cuestiones más relevantes que subyacen el tema de los embalses, es la materia orgánica del suelo y la biomasa de las plantas que quedan inundadas [6]. La degradación aeróbica/aerobia de la materia orgánica produce dióxido de carbono, el cual se reduce a metano en un ambiente anóxico, emitiéndose posteriormente hacia la atmósfera [7]. Estos sistemas se ven entonces forzados a descomponer rápidamente toda la carga orgánica inundada adicional a la carga orgánica que entra en los tributarios, produciendo CO_2 y CH_4 como producto final de la descomposición [8]. Por su parte, los microorganismos, requieren una fuente de energía y carbono, la cual obtienen a partir de la degradación de la materia orgánica presente en el embalse y adicionalmente, otros constituyentes del agua en los tributarios como el nitrógeno y el fósforo, y en el caso de los sistemas aerobios, concentraciones altas de oxígeno disuelto en el agua [9]. Dentro de las actividades metabólicas que llevan a cabo los microorganismos, se distinguen principalmente tres casos [10]; sistemas aerobios, ocurren cuando existe oxígeno disuelto en el medio y por lo tanto los microorganismos lo utilizan como aceptor de electrones para la transformación de la materia orgánica, dando como resultado un alto nivel energético en la generación de energía, la cual es posteriormente utilizada para el crecimiento celular [11]. Sistemas anaerobios, en este caso el aceptor final de electrones es el CO_2 [12],

como resultado de este proceso biológico, la mayor parte de la materia orgánica es transformada a CH_4 [13]. Finalmente, en los sistemas anóxicos, el aceptor de electrones suelen ser los nitratos, dando como resultado final la liberación de N_2O o N_2 según el comportamiento de los microorganismos presentes [14].

En este estudio se evaluó la generación de gases de efecto invernadero y los factores que intervienen en la transformación de la materia orgánica, a partir de ensayos de degradación aerobia y anaerobia en reactores en batch empleando el agua proveniente de un embalse tropical y simulando las condiciones reales presentes en el embalse previo al llenado y posterior a este.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se presenta la descripción de la metodología empleada en el estudio.

A. Zona de estudio y recolección de muestras

Las muestras para el análisis en el laboratorio fueron obtenidas en un embalse tropical ubicado en el departamento de Santander, Colombia; aguas abajo del río Sogamoso y aguas arriba de la desembocadura del río Magdalena [15]. Este estudio se centró en dos puntos estratégicos del embalse; P1 que corresponde a la entrada del río Sogamoso que constituye uno de los principales afluentes del embalse, además de ser la confluencia entre el río Suarez y el río Chicamocha. Y el segundo punto, P2, que corresponde al punto de entrada de una quebrada que presenta asentamientos de poblaciones cercanos y adicionalmente, previo al llenado del embalse esta zona tenía como principal uso la actividad ganadera, lo que conlleva a poseer alta carga de materia orgánica, siendo un punto que genera un alto grado de interés ambiental. Se recolectaron en total 8 muestras de agua, 4 muestras en cada punto, en la zona fótica (a 20 cm de la superficie del agua), durante diferentes épocas del año; seca y lluvia. Todas las muestras se recolectaron en recipientes de plástico, con capacidad de 10 litros para ser transportadas al laboratorio del grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDICON), refrigeradas a 4°C y proceder al montaje de los reactores y demás experimentos.

B. Montaje experimental

Los experimentos se realizaron en 16 reactores de acrílico; 8 para los ensayos aerobios y 8 para los anaerobios (Figura 1) con un volumen útil de 5 L cada uno y una relación altura/diámetro de 2. Para los ensayos aerobios, cada reactor tenía conectada una bomba de aire con una capacidad de aireación 1200 cc/min y dos difusores de burbuja fina. Los reactores tenían tres válvulas de apertura rápida que permitían la toma de muestras de agua y una válvula superior para recolectar las muestras de gases para análisis de CO₂ y CH₄ (cada 5 días), empleando bolsas tedlar de 0.25 L y una bomba de extracción de gases modelo GilAir 3, con un flujo de operación desde 850 a 3000 cc/min y además, evitaba la pérdida de agua por evaporación. Los reactores operaron durante 200 días, a una temperatura de 25°C, pH en el rango de 7-8 y para los reactores aerobios el oxígeno disuelto se mantuvo >4 mg/L.

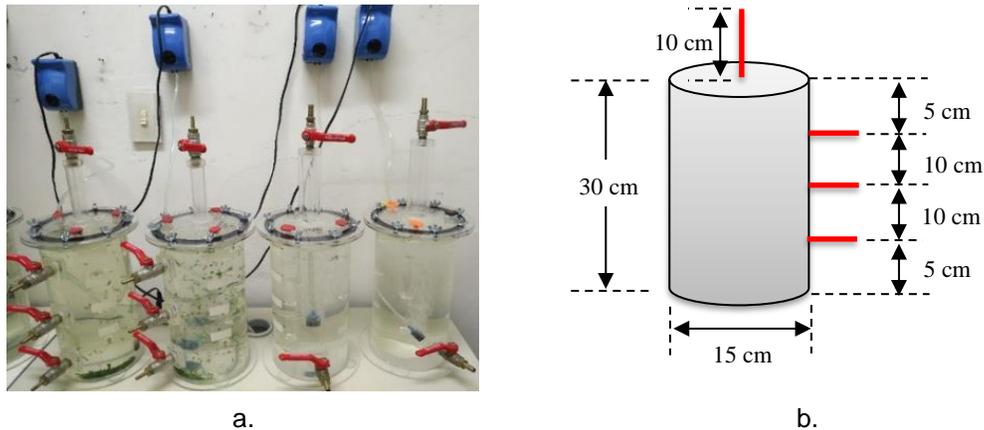


Fig. 1. Montaje experimental en reactores. a) Reactores. b) Dimensiones de los reactores.

Para el análisis experimental se emplearon cuatro reactores para evaluar las condiciones de cada punto de muestreo; solo agua y agua con material vegetal, en condiciones aerobias y anaerobias, ambos por duplicado. El material vegetal empleado fue extraído de la franja de protección del embalse y estaba compuesto por hierba y hojarasca de diferentes especies, las cuales fueron previamente caracterizadas, trituradas, tamizadas a 0.5 μ m y adicionadas en proporciones de 3

g (Peso húmedo) para cada reactor, siguiendo la metodología descrita por Lopera et al. [16].

C. Análisis de laboratorio

Para el análisis de los parámetros *in situ* se utilizó un conductímetro WTW 3210 para medir la conductividad, un equipo multiparámetro HQ40d para la medición del oxígeno disuelto y un pH metro WTW pH 7110 para la lectura del pH. Adicionalmente, se analizaron los parámetros fisicoquímicos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST) y Volátiles (SV), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitratos (NO_3^-), Fósforo Total en el agua y Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Amonio (NH_4^+) en el material vegetal, siguiendo los criterios analíticos del Estándar Métodos [17]. Para la determinación del Carbono Orgánico Disuelto (COD) se empleó el método combustión a alta temperatura, filtrando previamente la muestra a analizar a través de un filtro de membrana de Nylon de $0.45 \mu\text{m}$ en viales de 40 mL previamente muflados a una temperatura aproximada de 550°C durante al menos una hora, luego cada uno de los viales fueron preservados a $\text{pH} < 2$ utilizando ácido fosfórico H_3PO_4 , para ser llevados a su posterior lectura en el analizador de carbono orgánico total Apollo 9000. El contenido de carbono en la hierbavy la hojarasca se obtuvo mediante el producto de la biomasa seca y el carbono orgánico determinado en el laboratorio, empleando el método B: Oxidación húmeda (Método Walkley y Black) de la NTC 5403. Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio del grupo GDCON, laboratorio acreditado para el análisis de aguas por el IDEAM bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025, Resolución 1665 del 12 de julio de 2011.

Las muestras de gases se analizaron empleando un cromatógrafo de gases Agilent 7890B con un sistema de tres válvulas y dos detectores con columnas de acero inoxidable empaquetadas de 1/8" (HayeSep Q 80/100 UM 3Ft 1/8 2 mm), con detector de masas 5975C para la determinación tanto del CO_2 como del CH_4 . Las condiciones cromatograficas fueron 100°C para la temperatura del horno, 325°C temperatura del metanizador y 1 mL de muestra en el loop. Como material de referencia, se utilizó una mezcla de gases estándar certificados (Matheson, EE.

UU.) Que contenía CO₂ (2030 ppm v/v), CH₄ (2000 ppm v/v) y helio como gas de equilibrio. El nitrógeno se seleccionó como gas portador durante la separación cromatográfica. Los tiempos de retención fueron 1.428 min para el CH₄ y 2.650 min para el CO₂. Finalmente, los resultados de CH₄ fueron convertidos a CO_{2eq} multiplicando por 28, según los lineamientos establecidos por la IPCC [3].

D. Análisis estadísticos

Se determinaron las correlaciones entre las variables estudiadas de DQO, COD y GEI; correlaciones de Pearson en el intervalo [-1 a 1], con un tamaño de muestra de 64. El análisis estadístico se realizó con el software R versión 3.1.1.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados encontrados posterior a la experimentación con los reactores en batch se presentan en este capítulo.

A. Caracterización inicial

Se realizó una caracterización inicial del agua de las estaciones de muestreo P1 y P2 seleccionadas en este estudio (Tabla 1). Para el caso de la materia orgánica, P1 presentó concentraciones más altas, comparadas con P2, con una concentración de DQO de 20.23 mg O₂/L y una de COD de 10.39 mg C/L, frente a concentraciones de 16.0 mg O₂/L y 9.90 mg C/L, respectivamente para P2. Por otro lado, se evidenció una mayor concentración de ST y SV en P2, con valores de 242.6 mg/L y 56.4 mg/L respectivamente, comparado con P1 en el cual se encontraron concentraciones del orden de 142.0 mg/L de ST y 47.8 mg/L de SV. En ambos puntos, es evidente que hay un mayor aporte de sólidos de naturaleza inorgánica, lo cual puede estar relacionado con los procesos de extracción de minerales que se llevan a cabo cerca a la cola del embalse, los cuales introducen un gran contenido de este material en los ríos y fuentes cercanas. Adicionalmente, en cuanto a los SST se reportaron valores por debajo del límite de detección (< 5 mg/L) en ambos casos, indicando un gran aporte de sólidos disueltos y corroborando lo mencionado anteriormente. Se destaca que, en ambos puntos de muestreo, la tendencia es a un pH ligeramente

básico, con 8.1 y 7.6 para P1 y P2 respectivamente, lo que se puede relacionar con el aporte de nutrientes en estos dos puntos y especial en P2 donde el fósforo total tuvo un valor de 0.38 mg P/L, mientras que en P1 la concentración fue inferior (0.16 mg P/L). Es importante destacar que en P1 hay asentamientos cercanos lo que puede dar lugar a descargas de detergentes o incluso aporte por abonos agrícolas en zonas cercanas, estos resultados contrastan con el cálculo del índice de calidad (ICA) de seis variables [10], ya que en ambos puntos de muestreo el resultado fue una calidad del agua regular con un indicador amarillo, siendo mas contaminado en este caso P2 comparado con P1, al tener el ICA más bajo (0.59).

Tabla 1. Caracterización del agua del embalse

Parámetro	Unidades	Estación de muestreo	
		P1	P2
ST	mg/L	142.0	242.6
SV	mg/L	47.8	56.3
SST	mg/L	< 5.0	< 5.0
COD	mg C/L	10.39	9.90
DQO	mg O ₂ /L	20.23	16.0
Nitratos	mg NO ₃ /L	0.32	0.54
Fósforo total	mg P/L	0.16	0.38
pH	-	8.1	7.6
OD	mg/L	6.4	6.3
Conductividad	uS/cm	180	200
Temperatura	°C	26.4	27.2
Heterótrofos	UFC/mL	7.5 x 10 ⁵	3.8 x 10 ⁶
Índice de calidad*	-	0.62 Regular	0.59 Regular

*Calculado según el IDEAM [10], con 6 variables.

Finalmente, con el fin de verificar la relación de materia orgánica y nutrientes necesarios para favorecer el crecimiento de los microorganismos tanto aerobios como anaerobios, se calculó la relación DQO/N/P. Para P1 la relación fue 100/2/0.5 (350/5/2) y para P2 fue 100/3/2 (350/11/7). Estudios realizados por Escaler y Mujeriego [18], establecieron que una relación de 100/5/1 suele ser óptima para llevar a cabo los procesos biológicos aerobios, mientras que Mata [19] determinaron una relación óptima de 350/7/1 en procesos anaerobios, indicando que los microorganismos anaerobios tienen un requerimiento nutricional menor comparado con los aerobios, debido al alto rendimiento energético que estos tienen. Teniendo en cuenta lo anterior, en ambos puntos de muestreo (P1 y P2), la relación de materia

orgánica, nitrógeno y fósforo favorece significativamente los procesos anaerobios en especial en P2. En ambos casos, hay un déficit de nitrógeno para llevar a cabo los procesos biológicos aerobios.

La caracterización inicial del material vegetal (Tabla 2), se le realizó a la hierba y hojarasca, siendo esta última las hojas que caen de los árboles y cubren los suelos. El porcentaje tanto de nutrientes como materia orgánica fue similar en la hierba y hojarasca, con valores de 82.99 % de Materia Orgánica (MO), 48.14% de Carbono Orgánico (CO) y 1.51% de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) para la hierba, frente a 70.76% de MO, 41.04% de CO y 1.75% de NTK para la hojarasca respectivamente, siendo en este caso la MO y el CO ligeramente inferior y el NTK ligeramente superior que en la hierba. De otro lado, en cuanto a los nutrientes disponibles, la hojarasca presentó concentraciones mayores que la hierba con valores de 448.38 mg NH₄⁺/Kg y 2103.75 mg PO₄³⁻/Kg. Estudios realizados por Aceñolaza et al. [20] sugieren que la descomposición de material vegetal como la hojarasca constituye la principal fuente de suministro de nutrientes en el suelo, los cuales son parte fundamental de los ciclos biogeoquímicos tanto del carbono como del nitrógeno y el fósforo.

Tabla 2. Caracterización del material vegetal.

Material vegetal	MO	CO	NTK	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻
	----- (%)-----			----- (mg/Kg) -----	
Hierba	82.99 ± 4.28	48.14 ± 2.48	1.51 ± 0.39	284.32 ± 122.18	1033.16 ± 144.66
Hojarasca	70.76 ± 10.73	41.04 ± 6.22	1.75 ± 0.38	448.38 ± 81.96	2103.75 ± 453.61

MO = Materia Orgánica; CO = Carbono Orgánico; NTK = Nitrógeno Total Kjeldahl

B. Cinética de degradación de la materia orgánica

La Figura 2 muestra el proceso de degradación de la materia orgánica en los reactores en batch para el punto de muestreo P1 (Figura 2a) y para P2 (Figura 2b), en ambos casos bajo condiciones tanto aerobias como anaerobias. Para el caso de P1 solo con agua, los resultados evidenciaron que durante los primeros días (0 - 42 d), la velocidad de degradación fue mayor en el proceso aerobio comparado con el anaerobio, sin embargo, pese a que la degradación anaerobia fue mas lenta al inicio, se alcanzó una mayor degradación de la DQO a un tiempo de 200 d (4.03 mg/L), comparado con la DQO en el proceso aerobio la cual fue 4.68 mg/L para este

mismo tiempo. Estos resultados indican que los microorganismos aerobios en este caso emplearon una mayor cantidad de energía inicial para su crecimiento, lo que dio lugar a una velocidad de degradación mayor en los primeros días, mientras que los procesos anaerobios, por el contrario, si bien el crecimiento pudo ser menor en los primeros días de degradación (0-42 d), posiblemente se adaptaron mejor a las condiciones presentes lo que ocasionó una mayor degradación de la materia orgánica final. Adicionalmente, los microorganismos aerobios al emplear una mayor cantidad de sustrato en los días iniciales pudieron entrar en fase endógena posteriormente, al tener mayor cantidad de biomasa y menor cantidad de sustrato, lo que pudo limitar el proceso de degradación. Corrales et al. [13], definieron que la velocidad de crecimiento máxima (μ_{max}) para los microorganismos aerobios era del orden de 7.2 d^{-1} , mucho mas elevada comparada con los microorganismos anaerobios en los cuales se definió entre $0.45 - 1.0 \text{ d}^{-1}$, adicionalmente el coeficiente de rendimiento (Y) para los aerobios fue definido como $0.430 \text{ g SSV/g DQO}$ y para los anaerobios como 0.18 g SSV/g DQO , lo que sustenta la relación de degradación de la materia orgánica comparada con la cantidad de biomasa generada en un proceso biológico de tipo aerobio y anaerobio, lo que supondría que en un reactor aerobio en batch al tener Y más elevada, se alcanzarían condiciones de respiración endógena rápidas, limitando la velocidad de degradación final.

En cuanto a los resultados empleando agua con material vegetal (MV), se encontró que en ambos procesos durante los primeros días no ocurrió una degradación de la materia orgánica, sino que por el contrario la concentración de esta aumentó hasta el día 21 para el proceso aerobio y hasta el día 28 para el anaerobio, con valores máximos de DQO muy similares entre si; 25.20 mg/L en el aerobio y 24.54 mg/L en el anaerobio. Posterior a esto, en ambos procesos se inició la degradación de la materia orgánica, hasta alcanzar un valor final de 10.82 mg/L de DQO a los 200 d en el proceso aerobio y 8.43 mg/L en el anaerobio, resultado que comprueba lo expuesto anteriormente con respecto a la respiración endógena en los procesos aerobios. El incremento en la concentración de DQO los primeros días está asociado a la liberación de material orgánico contenido en la hierba y hojarasca, mediante el rompimiento de las cadenas poliméricas, en este caso, Tejada et al.

[21] definieron que este material contiene polímeros estructurales y compuestos orgánicos solubles tales como; azúcares, aminoácidos, celulosa y lignina, lo que explicaría el incremento en la materia orgánica ocasionado durante los primeros días en los procesos de degradación.

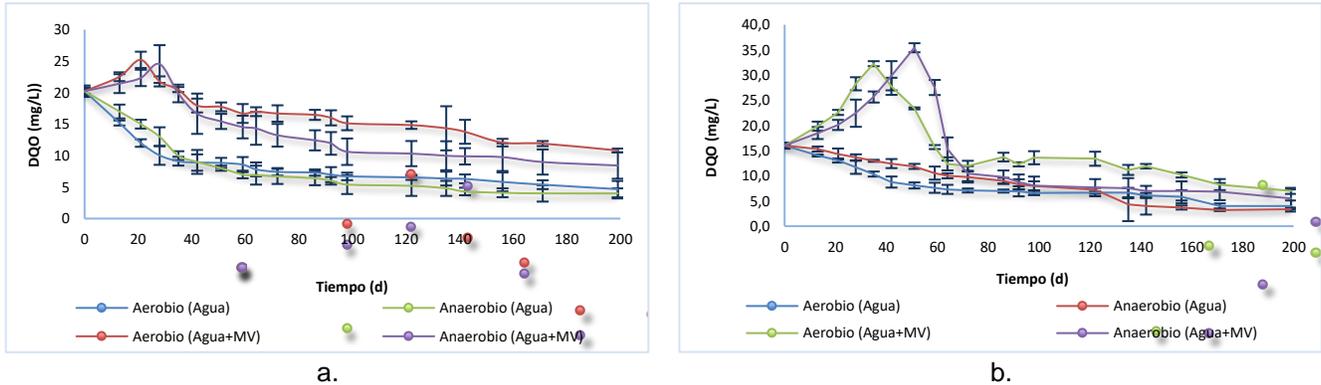


Fig. 2. Degradación de la materia orgánica en términos de la DQO por procesos aerobios y anaerobios. a) Comportamiento P1. b) Comportamiento P2.

Finalmente, para el caso de P2 (Figura 2b), los resultados fueron similares a los obtenidos con P1, donde para los reactores solo con agua la degradación de la materia orgánica fue mayor en el proceso aerobio hasta el día 122 y posterior a esto el proceso anaerobio alcanzó una menor DQO final, con un resultado de 3.4 mg/L al día 200, comparado con 4.0 mg/L en el proceso aerobio. Para los reactores con agua y material vegetal también ocurrió el mismo comportamiento que en P1, con un aumento de la DQO al día 35 (32.30 mg/L) para el proceso aerobio y día 51 (34.43 mg/L) para el anaerobio, en este último caso, la DQO alcanzó un valor más elevado indicando que el proceso anaerobio dio lugar a una mayor descomposición de los compuestos poliméricos presentes en la hierba y hojarasca. La DQO final fue 7.00 mg/L en el aerobio y 5.51 mg/L en el anaerobio.

La Tabla 3 muestra las constantes cinéticas calculadas a partir de las gráficas de degradación en términos de la DQO, se destaca que para el caso de los procesos con agua mas material vegetal (MV), la constante (K) se calculó con los datos a partir del proceso de degradación, es decir, se omitió el proceso en el cual aumentó la DQO como consecuencia del rompimiento de las cadenas poliméricas contenidas en la hojarasca y la hierba.

Tabla 3. Ecuaciones y constantes cinéticas de la materia orgánica

Punto de muestreo	Tipo de degradación	Composición	K (mg DQO/L.d)	Ecuación	R ²
P1	Aerobia	Agua	0.3281	$Y = -0.3281X + 19.68$	0.9750
	Anaerobia		0.2356	$Y = -0.2356X + 19.76$	0.9693
	Aerobia	Agua + Material Vegetal	0.3942	$Y = -0.3942X + 34.49$	0.9074
	Anaerobia		0.3293	$Y = -0.3293X + 31.73$	0.9721
P2	Aerobia	Agua	0.1430	$Y = -0.1430X + 15.74$	0.9738
	Anaerobia		0.0788	$Y = -0.0788X + 15.79$	0.9754
	Aerobia	Agua + Material Vegetal	0.6890	$Y = -0.6890X + 56.89$	0.9874
	Anaerobia		1.2506	$Y = -1.2506X + 99.05$	0.8659

Los resultados de la K corroboran lo mencionado previamente, donde la velocidad de degradación fue mayor en los procesos aerobios que anaerobios, a excepción de P2 con agua y materia vegetal (MV), donde la K = 1.2506 mg DQO/L.d en el proceso anaerobio comparado con 0.6890 mg DQO/L.d para el proceso aerobio. En todos los casos, la constante de degradación fue mayor donde se tenía agua más material vegetal, lo que indica que el aumento inicial en la DQO potenció los procesos de degradación vía aerobia y anaerobia, es decir, en un embalse, el material vegetal inundado cambia la dinámica tanto de los microorganismos, como de la descomposición de la materia orgánica que se realiza de forma natural en las aguas, acelerando el proceso y e incrementando la velocidad de degradación.

C. Emisiones de gases de efecto invernadero

La Figura 3 muestra los resultados de los gases de efecto invernadero (GEI) recolectados en los reactores. En el proceso aerobio se cuantificó el CO₂ y en el anaerobio tanto CO₂ como CH₄. Tanto en P1 (Figura 3a), como en P2 (Figura 3b), al inicio de la etapa anaerobia hay una ralentización del proceso mientras se establecen condiciones estrictamente anaerobias, es decir, la generación de GEI durante los primeros 30 días aproximadamente no muestra un incremento considerable, sin embargo, posterior a este proceso, el incremento en los GEI es importante y es mayor comparado con los GEI generados en el proceso aerobio, esta situación esta asociada a la producción de metano en el proceso anaerobio, siendo este un gas de efecto invernadero que posee un potencial de calentamiento mucho mas elevado que el del CO₂ (28 veces mayor) [3]. Los valores mayores de

GEI se obtuvieron en P1 tanto en los procesos en los cuales solo se evaluó el agua como en aquellos donde se evaluó agua mas material vegetal, lo que estuvo relacionado con la concentración inicial de DQO disponible al inicio del proceso, con valores de 10.764 g CO_{2eq}/m².d en el proceso aerobio y 12.296 g CO_{2eq}/m².d en el anaerobio solo con agua, frente a 9.816 g CO_{2eq}/m².d (Aerobio) y 11.816 g CO_{2eq}/m².d (Anaerobio) para P2 bajo la misma condición. En el caso de los ensayos con agua mas material vegetal los resultados fueron 24.342 g CO_{2eq}/m².d (Aerobio) y 35.210 g CO_{2eq}/m².d (Anaerobio) para P1 y 24.729 g CO_{2eq}/m².d (Aerobio) y 31.730 g CO_{2eq}/m².d (Anaerobio) para P2.

Comparando los resultados obtenidos de los flujos de CO_{2eq} empleando agua más material vegetal, con los resultados reportados por la IHA [22] (Tabla 4); se encuentra que para embalses en clima tropical los flujos difusivos reportan valores hasta de 20.580 g CO_{2eq}/m².d y para flujos por burbujeo 19.710 g CO_{2eq}/m².d, siendo los primeros más asociados a procesos de degradación aerobia y los segundos a procesos anaerobios. En este estudio los resultados fueron ligeramente superiores, en especial en los procesos anaerobios, otros autores como Guerin et al. [23], han reportados valores más elevados, del orden de 37.80 ± 17.6 g CO_{2eq}/m².d. En este sentido, se debe tener en cuenta que en la emisión de GEI existen variaciones no solo temporales sino también espaciales en las emisiones de GEI asociadas a un embalse, debido a diferentes causas, tales como: la temperatura, el tipo y densidad de vegetación inundada, las cargas de carbono, entre otros.

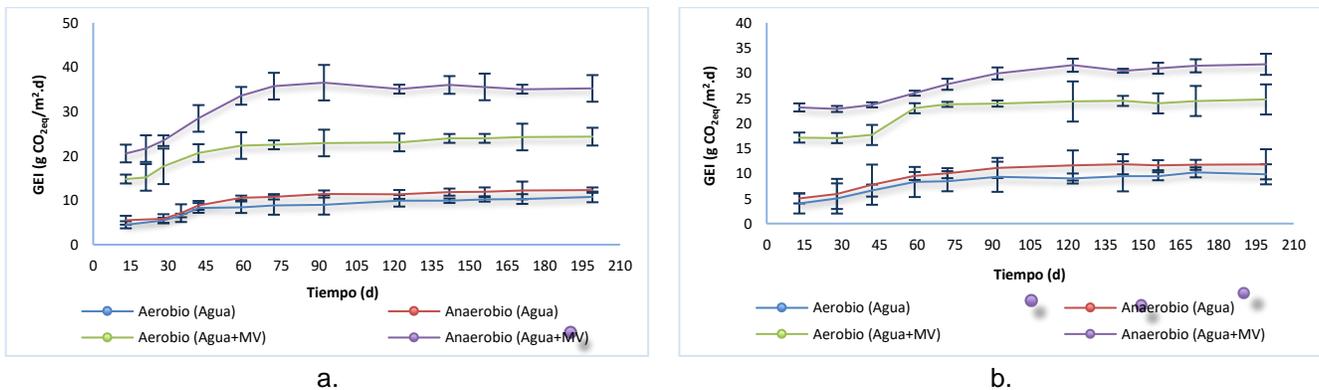


Fig. 3. Generación de gases de efecto invernadero (GEI) por procesos aerobios y anaerobios. a) Comportamiento en P1. b) Comportamiento en P2

Tabla 4. Valores de GEI por cada vía para clima tropical. Modificado de IHA [22].

Vía	GEI (g CO _{2eq} /m ₂ .d)	Referencia
Flujo Difusivo	20.580	[22]
Aerobio P1*	24.342	En este estudio
Aerobio P1*	24.729	En este estudio
Burbujeo	19.710	[22]
Anaerobio P1*	35.210	En este estudio
Anaerobio P2*	31.730	En este estudio

*Agua+MV

D. Medidas directas

Para poder evaluar las condiciones aerobias y anaerobias presentes en cada reactor y llevar un control a lo largo del tiempo se realizó la medición de los parámetros *in situ* mostrados como un promedio en la tabla 5.

Tabla 5. Medidas directas en los reactores

Punto	Condición	Proceso	Parámetro			
			Oxígeno Disuelto (mg/L)	Potencial Redox (mv)	pH	Conductividad (µs/cm)
P1	Agua	Aerobio	6.822 ± 0.33	339.569 ± 19.72	8.011 ± 0.16	232.269 ± 24.22
		Anaerobio	0.871 ± 0.26	-89.22 ± 10.37	7.473 ± 0.29	204.093 ± 13.98
	Agua + Material Vegetal	Aerobio	6.740 ± 0.36	235.606 ± 22.76	8.061 ± 0.08	255.375 ± 19.80
		Anaerobio	0.783 ± 0.30	-161.81 ± 19.11	6.673 ± 0.12	252.956 ± 27.10
P2	Agua	Aerobio	6.823 ± 0.33	331.156 ± 30.37	8.119 ± 0.17	241.469 ± 11.12
		Anaerobio	0.776 ± 0.29	-76.34 ± 12.56	7.809 ± 0.25	228.841 ± 10.37
	Agua + Material Vegetal	Aerobio	6.752 ± 0.37	298.538 ± 41.46	8.132 ± 0.11	277.894 ± 32.74
		Anaerobio	0.276 ± 0.34	-143.653 ± 10.56	7.304 ± 0.48	275.810 ± 18.34

Con respecto a las condiciones aerobias y anaerobias, el oxígeno disuelto y el potencial redox permitieron asegurar las condiciones establecidas, en el caso de los procesos aerobios, los valores de oxígeno disuelto fueron todos mayores a 6 mg/L con valores superiores para las condiciones donde solo se tenía agua (6.822 mg/L para P1 y 6.823 mg/L para P2) y ligeramente inferiores donde se tenía agua más material vegetal (6.740 mg/L para P1 y 6.752 mg/L para P2), estos resultados también fueron proporcionales al potencial redox donde todos los valores fueron positivos y superiores a 200 mV, asegurando las condiciones aerobias. En el caso de los procesos anaerobios, el potencial redox fue negativo demostrando condiciones mucho más anaerobias en el caso de agua más material vegetal y los oxígenos disueltos fueron todos cercanos a 0 mg/L. En cuanto al pH, los procesos

aerobios fueron ligeramente básicos con valores por encima de 8, mientras que, en los procesos anaerobios, se evidenció una ligera acidificación comparada con los aerobios, con valores entre 6.673 a 7.809, esta situación es producto del proceso anaerobio en el cual se da lugar a la formación de ácidos grasos volátiles a partir de la degradación de la materia orgánica, lo que tiende a acidificar el medio. Adicionalmente, los resultados evidenciaron un ambiente adecuado para el desarrollo de los microorganismos tanto aerobios como anaerobios, los cuales tienen un pH óptimo para su desarrollo celular entre pH 6 a 8. Finalmente, la conductividad fue mayor en los procesos en los cuales se tenía agua más material vegetal lo que se asocia con la transformación de la materia orgánica a compuestos inorgánicos lo que da lugar a la liberación de iones en el medio, los cuales incrementan la conductividad.

E. Correlación de variables

Con el fin de determinar la relación que existe entre las variables más importantes analizadas en los reactores se realizó un análisis de coeficiente de correlación Pearson entre las variables DQO, COD y GEI (Tabla 6). El valor del índice de correlación lineal varía en el intervalo [-1 a 1], permitiendo aproximar la relación de dependencia entre dos variables, una dependiente de la otra. Se evidenció una relación lineal positiva fuerte entre la DQO-COD, es decir una correlación proporcional, y negativa entre la DQO-GEI y COD-GEI, es decir inversamente proporcional, en los reactores con agua tanto aerobios como anaerobios. Para el caso de los reactores con agua mas material vegetal (MV), la correlación fue moderada, obteniéndose las mejores correlaciones entre la COD-GEI, adicionalmente, comparando los procesos aerobios con los anaerobios, las mejores correlaciones se encontraron en los procesos aerobios, indicando que los procesos anaerobios son mas complejos en su funcionamiento debido a que intervienen diferentes poblaciones microbianas y la ruta metabólica sigue siendo larga, lo que da lugar a productos de alta complejidad. Adicionalmente, la materia vegetal contiene materia orgánica de alta complejidad, que requieren por lo general una primera etapa de hidrólisis de los polímeros o de otro tipo de rompimiento de enlaces

poliméricos que ocurren más lentamente por acción de los microorganismos para la cual requieren de un periodo de aclimatación y adaptación.

Tabla 6. Coeficientes de correlación Pearson entre parámetros

Punto	Condición	Coeficiente de correlación Pearson		
		DQO-COD	DQO-GEI	COD-GEI
Agua	Aerobio	0.9694	-0.9478	-0.9917
	Anaerobio	0.9682	-0.9351	-0.9429
Agua + MV	Aerobio	0.8766	-0.6945	-0.8778
	Anaerobio	0.7623	-0.6612	-0.7693

Finalmente, se graficó el comportamiento de la DQO removida vs GEI (Figura 4) y se encontró que, para los procesos tanto aerobios como anaerobios solo con agua (Figura 4a), la relación es lineal y directamente proporcional. Sin embargo, en el proceso anaerobio con adición de material vegetal (Figura 4b), aunque las correlaciones son óptimas, estas fueron menores a los ensayos sin material vegetal, al respecto Ruiz et al. [25] encontraron que la generación de metano en ensayos con agua y material vegetal se explicaba mediante un modelo exponencial y el CO₂ mediante un modelo lineal, lo que explica porque no hay una correlación entre estas variables analizadas, teniendo en cuenta que en este caso los gases de efecto invernadero (GEI) calculados en los procesos anaerobios corresponden al CO₂ y CH₄ en forma de CO₂ equivalente.

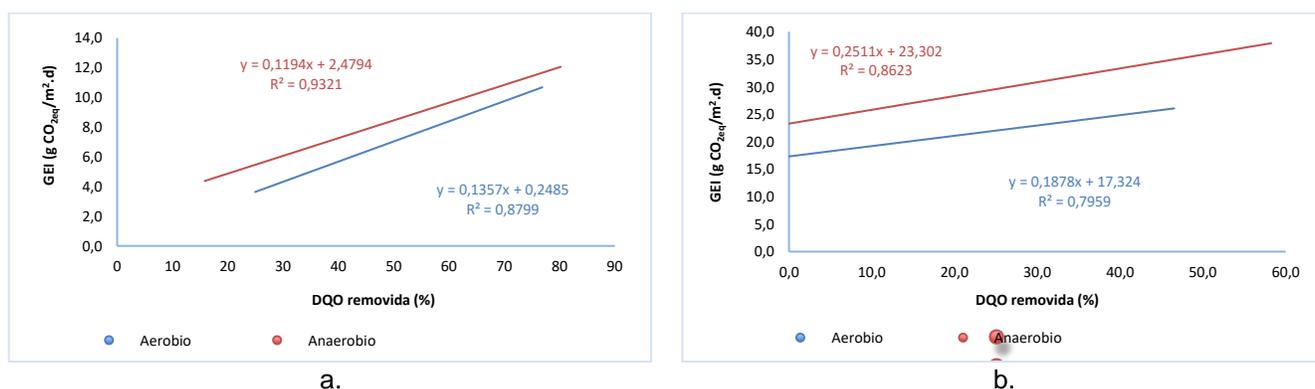


Fig. 4. Correlación de la remoción de materia orgánica y los GEI por los procesos aerobios y anaerobios. a) Agua. b) Agua + material vegetal.

IV. CONCLUSIONES

El material vegetal contenido después del proceso de inundación en un embalse, es transformado bioquímicamente en dos etapas; una primera etapa, donde se rompen las cadenas poliméricas y se da lugar al incremento en la concentración de DQO y posteriormente, en una segunda etapa, inicia el proceso de degradación de la materia orgánica, momento en el cual se da la mayor liberación de gases de efecto invernadero, en especial por procesos anaerobios, hasta que la materia orgánica restante sea recalcitrante y no sea asimilada fácilmente por los microorganismos, en este momento es cuando inicia el proceso de estabilización de las emisiones de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, la materia orgánica contenida solo en el agua, lo que simula las condiciones de los ríos, también genera gases de efecto invernadero, de allí la importancia de definir la línea base en los proyectos de construcción de embalses, con el fin de cuantificar los gases de efecto invernadero netos que son atribuibles al proceso de inundación del material vegetal.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Johanna E. Rodríguez realizó los ensayos de laboratorio, análisis de muestras y recolección de la información. Diana C. Rodríguez realizó la redacción del manuscrito y ajuste a normas de revista. Gustavo A. Peñuela realizó la revisión del artículo, administró el proyecto y obtuvo la financiación.

FINANCIACIÓN

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Programa Científico Colombiano en el marco de la convocatoria de propuestas Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842-218-2018). Además, agradecen a la empresa ISAGEN y al grupo GDCON de la Universidad de Antioquia por el financiamiento a través del acuerdo 47/26: "Cuantificación de las emisiones de GEI para el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso".

REFERENCIAS

- [1] R. Prasad, "Climate change assessment impacts of global warming, projections and mitigation of GHG emissions endorsing green energy," *International Educational Scientific Research Journal*, vol. 4 (1), pp. 33-48, Jan. 2018.
- [2] H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories," *Instituto de Estrategias Ambientales Globales (IGES)*, vol. 4, pp. 32., 2006.
- [3] H. O. Benavides, and G. E. Aristizabal, "Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático," *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Subdirección de meteorología, pp. 1-91. 2007.
- [4] A. W. Bambace, F. M. Ramos, B. T. Lima, and R. Rosa, "Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams," *Energy*, vol. 32 (6), pp. 1038-1046, Jun. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.008>
- [5] M. Demarty, and J. Bastien, "GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emissions measurements," *Energy Policy*, vol. 39 (7), pp. 4197-4206, Jul. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.033>
- [6] C. Galy, R. Delmas, C. Jambert, J. F. Dumestre, L. Labroue, S. Richard, and P. Gosse, "Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 11(4), pp. 471-483, Dec. 1997. <https://doi.org/10.1029/97gb01625>
- [7] H. D. Cuadros, Y. Cuellar, J. S. Chiriví, and M. Guevara, "GHG diffuse emissions estimation, and energy security to ENSO using MERRA-2 for largely hydroelectricity-based system," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 91, pp. 70-82, Apr. 2019. <https://doi.org/10.17533/10.17533/udea.redin.n91a07>
- [8] Q. Hao, S. Chen, X. Ni, X. Li, X. He, and C. Jiang, "Methane and nitrous oxide emissions from the drawdown areas of the Three Gorges Reservoir," *Science of the Total Environment*, vol. 660, pp. 567-576, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.050>
- [9] M. F. Umbarila., J. S. Prado and R. N. Agudelo, "Remoción de sulfuro empleando ozono como agente oxidante en aguas residuales de curtiembres," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 28 (51), pp. 25-38, 2019. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n51.2019.9081>
- [10] G. Roldan, and J. Ramírez, *Fundamentos de limnología neotropical*, Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, 2008
- [11] Y. Li, S. Liu, F. Chen, and J. Zuo, "Development of a dynamic feeding strategy for continuous-flow aerobic granulation and nitrogen removal in a modified airlift loop reactor for municipal wastewater treatment," *Science of The Total Environment*, vol. 714, e136764, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136764>
- [12] S. Mereu, J. Susnik, A. Trabucco, A. Daccache, L. Vamvakeridou, L. Renoldi, A. Dragan, and D. Assimacopoulos, "Operational resilience of reservoirs to climate change, agricultural demand, and tourism: A case of study from Sardinia," *Science of the total environment*, vol. 543(B), pp. 1028-1038, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.066>
- [13] L. C. Corrales, D. M. Antolinez, J. A. Bohorquez, and A. M. Corredor, "Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta," *NOVA*, vol. 13(24), pp. 55-81, Dec. 2015. <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>

- [14] Y. Kosugi, N. Matsuura, Q. Liang, and R. Yamamoto, "Nitrogen flow and microbial community in the anoxic reactor of "Sulfate Reduction, Denitrification/Anammox and Partial Nitrification" process," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 151, e107304, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107304>
- [15] M. Ruiz, D. C. Rodríguez, E. Chica, and G. Peñuela, "Calibration of two mathematical models at laboratory scale for predicting the generation of methane and carbon dioxide at the entrance point of the Chucurí river to the Topocoro Reservoir," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 21(1), pp. 11-22, Feb. 2019
- [16] L. M. Lopera, L. Oviedo, D. C. Rodríguez, and G. Peñuela, "Aplicación de ensayos en discontinuo para la determinación de flujos de metano y dióxido de carbono en la degradación del material vegetal en el embalse Topocoro," *Ingenierías USBMed*, vol. 7(2), pp. 67-73, Oct. 2016. <https://doi.org/10.21500/20275846.2598>
- [17] E. W. Rice, R. B. Baird, and A. D. Eaton, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington D.C. United States: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WPCF), 2017
- [18] I. Escaler, and R. Mujeriego, "Eliminación biológica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante un proceso discontinuo de fangos activados," *Ingeniería del agua*, vol. 8(1), pp. 67-77, Mar. 2001. <https://doi.org/10.4995/ia.2001.2860>
- [19] J. Mata, *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, London, United Kingdom: IWA Publishing, 2003
- [20] P. G. Aceñolaza, Z. Zamboni, W. Sione, and F. Kalesnik, "Caracterización de la región superior del Complejo Litoral del Río Paraná: Grandes unidades de ambiente," *INSUGEO*, vol. 17, pp. 293-308, Dec. 2008
- [21] C. Tejada, A. Herrera, and A. Villabona, "Assessment of Chemically Modified Lignocellulose Waste for the Adsorption of Cr (VI)," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e10298, 2020. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10298>
- [22] IHA (International Hydropower Associate), *GHG measurement guidelines for freshwater reservoir*, London, United Kingdom: UNESCO/IHA, 2010
- [23] F. Guerin, G. Abril, S. Richard, B. Burban, C. Reynouard, P. Seyler, and R. Delmas, R. "Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: significance of downstream rivers," *Geophysical Research Letters*, vol. 33(21), L21407, Nov. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006gl027929>