

COMPARACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA
SOLUBLE PRESENTE EN EL AGUA DEL EMBALSE TOPOCORO ENTRE UN
PROCESO ABIÓTICO COMO ES LA HIDRÓLISIS Y UN PROCESO BIÓTICO
ANAEROBIO

ANGIE JANEXY ALVERNIA ARIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2021

COMPARACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA
SOLUBLE PRESENTE EN EL AGUA DEL EMBALSE TOPOCORO ENTRE UN
PROCESO ABIÓTICO COMO ES LA HIDRÓLISIS Y UN PROCESO BIÓTICO
ANAEROBIO

ANGIE JANEXY ALVERNIA ARIAS

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química

Directora

Liliana del Pilar Castro Molano

PhD. Ingeniera Química

Codirectora

Diana Catalina Rodríguez Loaiza

PhD. Msc. Ingeniera Sanitaria

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2021

A Dios, por brindarme luz, salud y sabiduría para poder cumplir este gran logro.

A mis padres, por guiarme en todas las circunstancias de mi vida, por confiar siempre en mí y enseñarme que con esfuerzo y dedicación se puede lograr todo lo que se propone. Agradecerles inmensamente por brindarme siempre todo su amor y apoyo incondicional.

A mi hermana, que ha sido un gran ejemplo a seguir y quien, con todo el amor, me motivó y apoyó en todo el proceso de este gran proyecto.

A todos mis familiares, quienes han compartido y celebrado junto a mí, cada uno de mis triunfos.

A mi novio, quien, con mucho cariño, me acompañó y motivó en las noches más largas de estudio, para el desarrollo de este documento.

A mis amigos de la universidad Tania, Paulita, Javi y a todos los compañeros que además de regalarme momentos muy agradables, siempre estuvieron dispuestos a darme la mano cuando lo necesitaba.

Angie Janexy Alvernia Arias

AGRADECIMIENTOS

A mi querida alma máter la Universidad Industrial de Santander, por contribuir en mi crecimiento personal y formarme profesionalmente.

A la Universidad de Antioquia, que me aceptó y recibió en modalidad de pasantía investigativa para la realización de este trabajo de grado.

A mi directora Liliana del Pilar Castro Molano y a mi codirectora Diana Catalina Rodríguez Loaiza por la confianza puesta en mí, por permitirme hacer parte de este proyecto, mediante una experiencia tan enriquecedora como el intercambio académico, agradecerles por brindarme todo su conocimiento y apoyo.

Al laboratorio del Grupo Diagnóstico de Control y Contaminación (GDCON) por proporcionarme las instalaciones y equipos necesarios para el desarrollo experimental de este proyecto.

Al profesor Gustavo Peñuela, quien me brindó todo su conocimiento y asesoría para plantear y llevar a cabo esta tesis de grado.

A Fabian Úsuga por enseñarme y guiarme en toda la práctica experimental en el laboratorio GDCON.

Y finalmente a Linita, la secretaria de la Escuela de Ingeniería Química (UIS), por ser tan comprometida con su labor y amablemente ofrecer toda la información de una manera clara y concisa, en los momentos en que más se necesitaba.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI).....	16
2.2 EMBALSE.....	17
2.3 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EN EMBALSES	17
2.4 PROCESOS QUE SE DESARROLLAN EN LOS EMBALSES	19
2.4.1 Procesos abióticos.....	19
2.4.1.1 Hidrólisis.	20
2.4.2 Procesos bióticos.....	20
2.4.2.1 Procesos anaerobios.	20
3. METODOLOGÍA	22
3.1 ZONA DE ESTUDIO	22
3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL	24
3.2.1 Montaje de reactores biológicos.....	24
3.2.2 Montaje de reactores en batch.....	26
3.2.3 Montaje de reactores para hidrólisis.....	26
3.3 PARÁMETROS Y MEDICIONES DE LABORATORIO.....	27
3.3.1 Reactores biológicos.....	27
3.3.2 Monitoreo de reactores Batch.	30
3.3.3 Monitoreo de reactores con hidrólisis.....	30
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31

4.1 REACTORES BIOLÓGICOS ANAEROBIOS	31
4.1.1 Caracterización inicial.	31
4.1.2 Parámetros in situ.	32
4.1.3 Degradación de materia orgánica.	35
4.1.4 Dióxido de carbono y metano.....	38
4.2 REACTORES BATCH	40
4.3 HIDRÓLISIS	41
5. CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFÍA.....	45
ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Monitoreo de reactores y parámetros de medición.	27
Tabla 2. Caracterización inicial de las muestras.....	31
Tabla 3. Parámetros in situ con desviación estándar.....	32
Tabla 4. Porcentajes máximos de degradación reactores biológicos	37
Tabla 5. Porcentajes máximos de degradación por hidrólisis	41

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación geográfica zona de estudio	22
Figura 2. Localización estaciones de muestreo	23
Figura 3. A: Montaje de reactores biológicos del punto de muestreo Tablazo.....	25
Figura 4. A: Oxígeno disuelto para Tablazo. B: Potencial Redox para Tablazo. ...	33
Figura 5. A: Oxígeno disuelto para Agua Blanca. B: Potencial Redox para Agua Blanca.....	34
Figura 6. A: DQO para Tablazo. B: COD para Tablazo. C: SVT para Tablazo...	35
Figura 7. A: DQO para Agua Blanca. B: COD para Agua Blanca. C: SVT para Agua Blanca.....	36
Figura 8. A: CO ₂ producido por Tablazo. B: CH ₄ producido por Tablazo.....	38
Figura 9. A: CO ₂ producido por Agua Blanca. B: CH ₄ producido por Agua Blanca.	39
Figura 10. A: DQO para Tablazo en batch. B: DQO para Agua Blanca en batch.	41

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Determinación de la materia orgánica presente.	50
Anexo B. Ecuaciones utilizadas para calcular ST y SVT.....	51

RESUMEN

TÍTULO: COMPARACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE PRESENTE EN EL AGUA DEL EMBALSE TOPOCORO ENTRE UN PROCESO ABIÓTICO COMO ES LA HIDRÓLISIS Y UN PROCESO BIÓTICO ANAEROBIO*

AUTOR: ANGIE JANEXY ALVERNIA ARIAS**

PALABRAS CLAVE: EMBALSE TOPOCORO, HIDRÓLISIS, PROCESO BIÓTICO ANAEROBIO, GASES DE EFECTO INVERNADERO, DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.

DESCRIPCIÓN: El embalse Topocoro de la empresa ISAGEN, ubicado en el departamento de Santander cuenta con un gran proyecto de cuantificación y control de las emisiones netas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), durante el pre, pos y llenado del embalse. El presente estudio se enfoca en analizar y comparar la degradación de la materia orgánica soluble en el agua, causa principal de dichas emisiones, en dos puntos específicos de Topocoro, mediante un proceso biótico anaerobio y un proceso abiótico como la hidrólisis.

En consecuencia, se realizó un seguimiento por medio de reactores, de la concentración de diferentes parámetros, demanda química de oxígeno, carbono orgánico disuelto, sólidos totales, sólidos volátiles totales, dióxido de carbono, metano y parámetros in situ, para llevar un control del comportamiento de estos. Los porcentajes de degradación biológica variaron de 25% a 81% DQO, los valores más altos correspondían a los reactores que contenían solo agua, comparado con los reactores que tenían agua más material vegetal, por otro lado, la mayor cantidad de emisiones de GEI fue producida por el agua del punto de muestro que tenía una composición más compleja del residual. Dichos resultados fueron favorables, a pesar de ser un proceso espontáneo que no contó con la adición de ningún microorganismo, ni con un control estricto de las condiciones que favorecían el proceso.

Los porcentajes de degradación mediante hidrólisis obtenidos en una semana variaron de 29% a 55% DQO, valores favorables con este tipo de proceso considerando el corto tiempo para lograr dichos resultados.

Con las condiciones del embalse, puede darse la degradación de materia orgánica por medio de los dos procesos, tanto biótico como abiótico, sin embargo, el rendimiento de cada técnica dependerá tanto de las condiciones del residual como del control que se tenga sobre las diferentes variables que puedan afectar ambas técnicas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora Liliana del Pilar Castro Molano, Ingeniera Química PhD. Codirectora Diana Catalina Rodríguez Loaiza, Ingeniera Sanitaria PhD.

ABSTRACT

TITLE: COMPARISON OF THE DEGRADATION OF SOLUBLE ORGANIC MATTER IN THE WATER OF THE TOPOCORO RESERVOIR BETWEEN AN ABIOTIC PROCESS SUCH AS HYDROLYSIS AND AN ANAEROBIC BIOTIC PROCESS*

AUTHOR: ANGIE JANEXY ALVERNIA ARIAS**

KEYWORDS: TOPOCORO RESERVOIR, HYDROLYSIS, ANAEROBIC BIOTIC PROCESS, GREENHOUSE GASES, ORGANIC MATTER DEGRADATION.

DESCRIPTION: The Topocoro reservoir of the company ISAGEN, located in the department of Santander has a large project to quantify and control the net emissions of Greenhouse Gases (GHG), during the pre, post and filling of the reservoir. The present study focuses on analyzing and comparing the degradation of soluble organic matter in water, the main cause of such emissions, at two specific points of Topocoro, by means of an anaerobic biotic process and an abiotic process such as hydrolysis.

Consequently, the concentration of different parameters, chemical oxygen demand (COD), dissolved organic carbon, total solids, total volatile solids, carbon dioxide, methane and in situ parameters were monitored by means of reactors in order to control their behavior. The percentages of biological degradation varied from 25% to 81% COD, the highest values corresponded to the reactors that contained only water, compared to the reactors that in addition to water also had plant material; on the other hand, the greatest amount of GHG emissions was produced by the water of the sampling location. These results were favorable, despite being a spontaneous process that did not include the addition of any microorganisms or strict control of the conditions that favored the process.

The percentages of degradation by hydrolysis obtained in one week ranged from 29% to 55% COD, favorable values with this type of process considering the short time to achieve these results.

With the conditions of the reservoir, organic matter degradation can be achieved by both biotic and abiotic processes; however, the performance of one or the other technique will depend both on the conditions of the wastewater and on the control that can be had over the different variables that can affect both techniques.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Liliana del Pilar Castro Molano, Doctor in Chemical Engineering. Co-director Diana Catalina Rodríguez Loaiza, Doctor in Sanitary Engineering.

INTRODUCCIÓN

Los Gases de Efecto Invernadero, conocidos como GEI, son aquellos gases que, al estar presentes en la atmósfera en altas concentraciones, producen un incremento de la temperatura media del planeta dando lugar al calentamiento global. Los GEI tales como el Dióxido de Carbono (CO₂), el Metano (CH₄) y el Óxido Nitroso (N₂O) son liberados tanto de los ecosistemas naturales como de manera antropogénica¹, esta última influenciada en gran parte por la deforestación a nivel mundial y la combustión de fósiles para la generación de energía, es por esto que las energías renovables se han convertido en una gran alternativa para reducir favorablemente dichas emisiones, las cuales se consideran limpias por tener un impacto ambiental muy escaso y utilizar recursos inagotables². Una de ellas es la energía hidroeléctrica que suministra cerca del 20% de la electricidad mundial pero su crecimiento se ha visto limitado por el modesto potencial geofísico y espacial disponible para nuevas instalaciones, la capacidad de inversión incluyendo la controversia en torno a los impactos sociales y ambientales que conllevan las grandes represas junto a sus embalses³.

Los embalses inundan grandes extensiones de ecosistemas terrestres, lo que significa que, en los primeros años del post-llenado, se dispone de una gran cantidad de materia orgánica presente en el cuerpo de agua que se empieza a descomponer y a emitir gases como el dióxido de carbono y metano. Estas emisiones representan alrededor de 1,6 % de las emisiones de GEI a escala mundial, siendo el CH₄ un gas que contamina hasta 25 veces más que el CO₂⁴. La

¹ IPCC. Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Banco Mundial. 2001.

² IPCC. Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. 2011.

³ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA. UNESCO NEWS. [Sitio web]. [Consulta: 21 10 2020]. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-6-hydropower/>.

⁴ IPCC. Cambio Climático 2007: Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático 2007, 2007.

descomposición de material vegetal en los embalses ubicados en zonas tropicales cobra mayor importancia debido a que por sus características climáticas tienden a emitir mayor cantidad de GEI que los embalses ubicados en otras zonas.

En los embalses, diferentes factores inciden sobre la generación y emisión de gases de efecto invernadero, algunos de ellos son: la temperatura, la forma del embalse, la profundidad, el área, el tiempo de retención hidráulica, la edad, el tipo de ecosistema inundado, el sistema de oxigenación, la entrada de carbono (materia orgánica) y nutrientes al embalse, la productividad primaria y las condiciones prevalecientes en la cuenca, como la erosión, la deforestación y las condiciones sanitarias, entre otros⁵.

Otro factor que tiene incidencia sobre la emisión de GEI en los cuerpos de agua son los procesos de eutrofización, fenómeno que se ha convertido en un problema ambiental en el mundo puesto que va en aumento especialmente en lagos, embalses, humedales, estuarios y ríos. Esta alteración de los contenidos de nutrientes causa modificaciones de los ciclos biogeoquímicos del carbono, del nitrógeno y fósforo que pueden propiciar la generación de GEI en los cuerpos acuáticos⁶.

Por lo anterior, es importante la formulación de un modelo que permita estimar emisiones en embalses hidroeléctrico, en función de la edad del reservorio, altura, temperatura media de superficie, área inundada, volumen de inundación y otros parámetros⁷, sin embargo, para que eso sea posible se requieren estudios en el

⁵ CRUZ, Arturo y FRANCO, Jerónimo. Los embalses de presas como una fuente de gases de efecto invernadero: Una estimación de su emisión. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2008.

⁶ CANCHALA NASTAR, Teresita del Rocío. Generación de gases de efecto invernadero en los sedimentos de un humedal natural eutrofizado. Influencia de nutrientes N y P. Tesis de grado, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2014

⁷ PAUCAR SAMANIEGO, Mayra Alejandra y AMANCHA PROAÑO, Pablo. Estudio de emisiones de metano producidas por embalses de las centrales hidroeléctricas en Ecuador. 12º Congreso Iberoamericano De Ingeniería Mecánica. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2014.

tiempo que muestren las emisiones de GEI que se generan y la incidencia de la materia orgánica inundada en el embalse.

Aunque alrededor del mundo ya existe cierta cantidad de artículos científicos sobre la cuantificación de GEI producidos por embalses, en Colombia hay poca información y registro de las emisiones de GEI producidos por dichos cuerpos de agua, por lo tanto es imprescindible la implementación de estudios en los cuales se elabore una comparación y análisis entre la producción de dichos gases antes y después de la construcción de un embalse y de esta forma poder evaluar objetivamente la magnitud de los cambios logrados en torno a la creación del mismo.

Es por esta razón que es indispensable profundizar en el estudio de los procesos más importantes que tienen influencia en la formación de los GEI, comprender las dinámicas propias que se llevan a cabo en el ecosistema creado como producto de la implementación de estos proyectos con el fin de entender la dinámica de la formación y liberación de estos gases en los embalses acorde a la zona donde esté ubicado y finalmente proponer estrategias de mitigación y/o aprovechamiento del CH₄ en países en vía de desarrollo donde la transferencia de tecnologías no va al mismo ritmo de los países desarrollados⁸.

Es así, que en este proyecto se hace necesario estudiar las emisiones netas de CO₂, y CH₄ en puntos estratégicos del embalse Topocoro ubicado en el departamento de Santander y también, evaluar los procesos de degradación de la materia orgánica a partir de condiciones bióticas anaerobias y abióticas, con el fin de analizar dicho comportamiento.

⁸ GRUPO DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN (GDCON). Variación espacio-temporal de las emisiones netas de gases de efecto invernadero desde el pre-llenado hasta el post-llenado del proyecto hidroeléctrico Sogamoso. Universidad de Antioquia. Medellín. 2016.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la degradación biótica y abiótica de la materia orgánica presente en el embalse Topocoro, así como su influencia en las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la descomposición de la materia orgánica presente en el embalse Topocoro, mediante un proceso biótico anaerobio y su influencia en la generación de dióxido de carbono y metano.
- Estudiar la influencia de variables tales como el potencial de hidrógeno (pH), para la degradación de la materia orgánica mediante un proceso abiótico como la hidrólisis.
- Comparar la degradación de los procesos tanto biótico como abiótico mediante el análisis entre los resultados obtenidos en el laboratorio con la información relacionada en estudios previos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

Los gases de efecto invernadero son los componentes gaseosos que se encuentran en la atmósfera, dichos gases tienen la capacidad de absorber y emitir radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja⁹, ocasionando un aumento de energía calorífica por medio de un proceso natural de interacción entre los gases y la luz solar, esta energía es liberada en la superficie y atmósfera inferior de la Tierra, lo que produce diferentes variaciones climáticas. Este proceso natural conocido como efecto invernadero se ha visto potenciado por la emisión de GEI de origen antropogénico y su constante incremento ha favorecido el aumento y retención de calor, en el sistema superficie-tropósfera^{10 11 12}.

Existe una gran cantidad y variedad de GEI en la atmósfera de la tierra, los principales gases son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el metano y el ozono, también se encuentran una serie de GEI creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro, bromo y flúor como el hexafluoruro de azufre, los hidrofluorocarbonos y los perfluorocarbonos¹³.

⁹ BENAVIDES BALLESTEROS, Henry. y LEÓN ARISTIZABAL, Gloria. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2007.

¹⁰ IPCC. 2001.Op. cit.

¹¹ PULIDO GUIO, Anda Derly, *et al.* Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Colombia. IDEAM, 2015.

¹² MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MINAMBIENTE). Gases Efecto Invernadero. [Sitio web]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/462-plantilla-cambio-climatico-18>

¹³ CENTRO DE CONTAMINACIÓN Y QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA (CECONT), INSTITUTO DE METEOROLOGÍA (INSMET). Gases de efecto invernadero: Conceptos básicos. [En línea].Cuba. Disponible en: <http://www.insmet.cu/emisiones/pdf/Conceptos%20b%C3%A1sicos.pdf>

2.2 EMBALSE

Un embalse es un depósito de agua creado de manera artificial como consecuencia de la construcción de una represa, esta masa de agua se forma sobre el lecho de un río o arroyo, la cual cierra parcial o totalmente su cauce, ocasionando una gran alteración ambiental y social. Cuando el embalse es llenado, la flora, la fauna y el paisaje sufren drásticos cambios ocasionando pérdidas irreversibles de ecosistemas terrestres generalmente productivos¹⁴ y dando origen a nuevos ecosistemas que dependerán de la calidad de los suelos inundados, especies acuáticas vegetales y animales preexistentes, profundidad media, tiempo de permanencia de las aguas y clima, entre otros factores influyentes.

La creación de un embalse trae consigo algunas ventajas como la generación de energía eléctrica a partir del agua contenida, riego de cultivos, abastecimiento de agua potable para la población, desarrollo de la industria pesquera, regularización del caudal aguas abajo de la represa y práctica de deportes acuáticos¹⁵.

2.3 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EN EMBALSES

Las emisiones de gases de efecto invernadero en los embalses, se deben principalmente a la degradación de la materia orgánica, materia que está compuesta principalmente por vegetación, aguas residuales, compuestos orgánicos transportados por los ríos y plantas acuáticas que crecen y mueren en el embalse¹⁶.

¹⁴ BUSTAMANTE FERNÁNDEZ, Carlos Arturo. Efectos ambientales generados por la construcción y operación de un embalse. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Universidad de Sucre. Sincelejo, 2008.

¹⁵ FRANQUET BERNIS, Jose María. ¿Qué es un embalse y para qué sirve?. Agua que no has de beber: 60 respuestas Plan Hidrológico Nacional. 2010. pp. 22-30.

¹⁶ BRUCE, Forsberg. La Represa Inambari – Gases de Efecto Invernadero (GEI). Wildlife conservation society.2013.

Las emisiones de dióxido de carbono y metano están potencialmente influenciadas por la descomposición de la vegetación inundada y la materia orgánica del suelo del embalse.

El principal producto de la digestión anaerobia de materia orgánica es el Metano, en las aguas del fondo y sedimentos del embalse que suelen ser anóxicos se favorece la producción de este gas de efecto invernadero¹⁷.

Diversos estudios^{18 19 20} afirman que, en los primeros años después de la inundación, las tasas tanto de actividad bacteriana como la producción de CO₂ y CH₄ son particularmente altas, sin embargo, a medida que transcurre el tiempo esta producción disminuye y tiende a ser constante.

Otro factor importante que contribuye a la producción de CO₂ y CH₄ es el clima, de acuerdo a la zona donde esté ubicado el embalse; para los embalses situados en las zonas boreal y semiárida, los valores de emisiones son similares, donde se obtiene una mayor producción de CO₂ que de CH₄ ²¹, en cambio, los embalses situados en zonas tropicales, poseen mayor aporte de materia orgánica debido a las altas temperaturas y abundantes lluvias, lo que incrementa las reacciones de oxidación de los sedimentos, favoreciendo así la emisión de CH₄, esta última con mayor proporción comparada con la cantidad de emisiones de CO₂ ²².

¹⁷ HERNÁNDEZ, María Elizabeth. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. SciELO. Veracruz. 2009

¹⁸ BAMBACE, L. A. *et al.* Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams. ELSEVIER. 2007.

¹⁹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Agencia de noticias UN. Embalses también emiten gases de efecto invernadero. [Sitio web]. Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/embalses-tambien-emiten-gases-de-efecto-invernadero.html>.

²⁰ DEMARTY, M. y BASTIEN, J. Emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 year of CH₄ emissions measurements. ELSEVIER. 2011.

²¹ LOAIZA MERA, Sanda Patricia. Cuantificación de gases de efecto invernadero generados en represa y embalses tropicales: caso Calima. Valle del Cauca. 2016.

²² PALAU, Antoni. y PRIETO, Clemente. Hidroelectricidad, embalses y cambio climático,» Fundación para el fomento de la ingeniería del agua. 2009.

La cuantificación de los gases de efecto invernadero, CO₂ y CH₄, producidos en los embalses, se realiza mediante metodologías tales como: el cono invertido y la cámara estática flotante de acuerdo a las directrices del IPCC del 2006, modelo BCL (Biome Carbon Loss) y la guía del IHA para la medición de GEI en embalses²³.

2.4 PROCESOS QUE SE DESARROLLAN EN LOS EMBALSES

La construcción de un embalse hidroeléctrico se lleva a cabo inundando un ecosistema terrestre por lo tanto habrá una gran cantidad de materia orgánica disponible para someterse a diferentes procesos a lo largo del tiempo, de acuerdo a ciertas características del embalse como son la temperatura; que afecta la velocidad de los procesos biológicos y fisicoquímicos, por otro lado la incidencia de luz; relacionado a su vez con la profundidad, y el embalse de acuerdo a esta característica en zonas fótica, disfótica y afótica, esta capacidad de luz en cada zona afecta los procesos de fotosíntesis de manera directa; y por último está la disponibilidad de oxígeno; que se hace mayor en la superficie por la interacción del agua con el aire y también por la actividad fotosintética favoreciendo así los procesos aerobios, en cambio en los sedimentos o en el fondo del embalse ocurre todo lo contrario, por lo que en esta zona se favorecen los procesos anaerobios²⁴.

2.4.1 Procesos abióticos. Los procesos abióticos hacen referencia a aquellos procesos en los cuales no se requiere de la acción de los seres vivos para producir un cambio físico o químico del ecosistema, es decir, un proceso en el cual no se realizan funciones vitales dentro de sus estructuras orgánicas, pero son fundamen-

²³ GRUPO DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN (GDCON).Op. cit.

²⁴ CORREA BRAVO, Jefferson. Emisiones de gases de efecto invernadero en el humedal natural El Madrigal. Trabajo de grado Ingeniero Sanitario y Ambiental.Universidad del Valle. Santiago de Cali. 2016.

tales para la supervivencia de cualquier comunidad biológica²⁵.

2.4.1.1 Hidrólisis. La hidrólisis se describe como un proceso abiótico donde ocurre una reacción química que involucra la participación del agua para el rompimiento de enlaces ya sea de moléculas o iones tanto orgánicas como inorgánicas²⁶.

Dicho rompimiento depende de diversos factores como la solubilidad, el pH y el potencial de oxidación-reducción que tenga un determinado compuesto, es por eso que el agua por sí sola es incapaz de romper un determinado enlace covalente y generar dicha descomposición. Para que el proceso de hidrólisis se lleve a cabo es necesario que ocurra en un medio ácido o en un medio alcalino con presencia de iones H_3O^+ u OH^- , respectivamente.

2.4.2 Procesos bióticos. Los procesos bióticos son aquellos que requieren de la actividad directa de seres vivos para ocasionar un cambio físico o químico en un ecosistema.

2.4.2.1 Procesos anaerobios. Se clasifica como un proceso biótico anaerobio, aquel donde bacterias anaerobias tanto estrictas como facultativas en ausencia de oxígeno y rigurosos requerimientos tales como bajo potencial redox (-300 mV) y pH neutro llevan a cabo la degradación de materia orgánica a través de una serie de etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis)²⁷ que da lugar a una mezcla de gases, en los cuales principalmente se encuentra el metano y el dióxido de carbono, dicha mezcla puede contener metano en una proporción de 50

²⁵ UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM). Biología 2: ¿Qué son los factores abióticos y bióticos?. [En línea]. Disponible en: <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia2/unidad2/abioticosbioticos/queson>.

²⁶ GONZÁLES, A. Hidrólisis. 2009.

²⁷ RUBIO CLEMENTE, Ainhoa; CHICA ARRIETA, Edwin Lenin y PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio. Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes, Universidad de Antioquia- Laboratorio GDCON. Medellín.

a 80% y dióxido de carbono de 20 a 50%²⁸ con pequeñas cantidades de otros componentes como nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno, estos valores dependen tanto de los microorganismos que se encuentren presentes como del proceso en sí²⁹.

²⁸ LORENZO ACOSTA, Yaniris y OBAYA ABREU, Ma. Cristina. La Digestión Anaerobia. Aspectos teóricos. Parte 1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). La Habana. 2005.

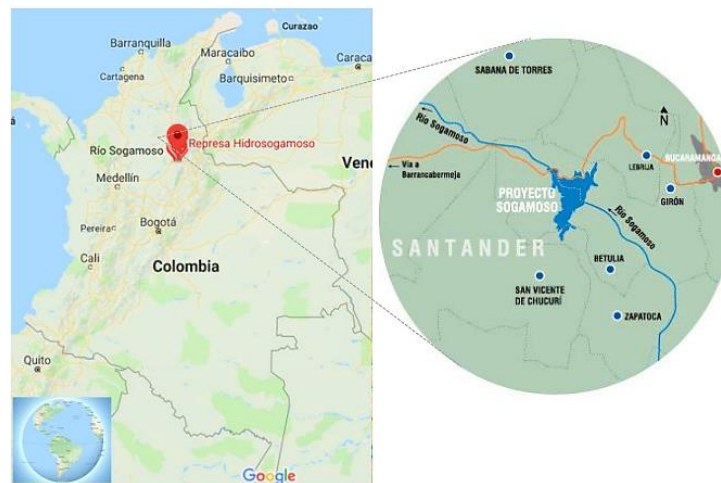
²⁹ CORRALES, Lucía Constanza, *et al.* Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá. 2015.

3. METODOLOGÍA

3.1 ZONA DE ESTUDIO

El embalse Topocoro ubicado en la hidroeléctrica Sogamoso se encuentra en el departamento de Santander, aproximadamente a 30km de la ciudad de Bucaramanga, en el cañón donde el río Sogamoso cruza la Serranía de La Paz, 75 km aguas arriba de su desembocadura en el río Magdalena y 62 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Suárez y Chicamocha³⁰. La Hidroeléctrica Sogamoso o Hidrosogamoso como es comúnmente llamada se encuentra en jurisdicción de los municipios de Girón, Betulia, Zapatoca, Los Santos, Lebrija, San Vicente de Chucurí, Barrancabermeja, Puerto Wilches y Sabana de Torres que conforman su área de influencia (Figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica zona de estudio



Fuente: BACCA GARCÍA, Javier Orlando. Análisis de la viabilidad de la hidroelectricidad en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2019. Fig. 4-1

³⁰ ISAGEN. Central Hidroeléctrica Sogamoso [Sitio web]. Disponible en: <https://www.isagen.com.co/es/nuestro-negocio/generamos-energia#central-hidroelectrica-sogamoso>.

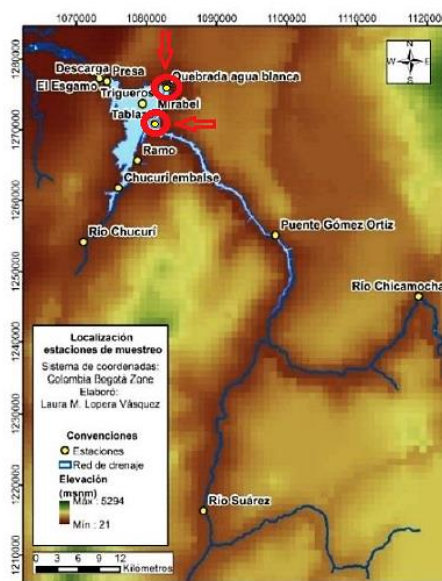
De acuerdo con ISAGEN³¹, el embalse cuenta con una extensión de aproximadamente 7.000 hectáreas y posee la mayor capacidad de almacenamiento de agua del país, con un volumen de 4.800 millones de m³.

Debido a la gran extensión de agua que posee el embalse, este estudio se enfocó particularmente en analizar solo dos puntos estratégicos, como se aprecia en la figura 2, que poseen algunas diferencias en su composición los cuales fueron:

El primer punto es Tablazo, ubicado en la entrada del río Sogamoso al embalse, este afluente es la fuente principal de la represa lo que convierte a Tablazo en un punto importante con constante movimiento de agua.

El segundo punto de recolección de muestras es la quebrada Agua Blanca, una zona con alta carga orgánica debido a la desembocadura de vertimientos de aguas residuales provenientes de poblaciones cercanas y la inundación de tierras en ese sector anteriormente utilizadas con actividad ganadera.

Figura 2. Localización estaciones de muestreo



³¹ ISAGEN. Central Hidroeléctrica Sogamoso, una megaobra para la región y el país. [Sitio web]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=SV65fFobyW4&ab_channel=ISAGEN.

Fuente: Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON). Variación espacio-temporal de las emisiones netas de gases de efecto invernadero desde el pre-llenado hasta el post-llenado del proyecto hidroeléctrico Sogamoso, Universidad de Antioquia, Medellín, 2016.

Para la recolección del agua a analizar se realizaron en total tres muestreos en los cuales se utilizaron recipientes plásticos con capacidad de 10 litros, para evitar los mínimos cambios en las características de las muestras, los recipientes fueron llenados completamente evitando así la creación de burbujas de aire en el interior de estos y al momento de ser transportados desde el embalse Topocoro hasta el Laboratorio del Grupo de Investigación Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON) perteneciente a la Universidad de Antioquia ubicado en la ciudad de Medellín, fueron movilizados en neveras de icopor y refrigerados con el fin de mantener una temperatura adecuada y constante.

3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

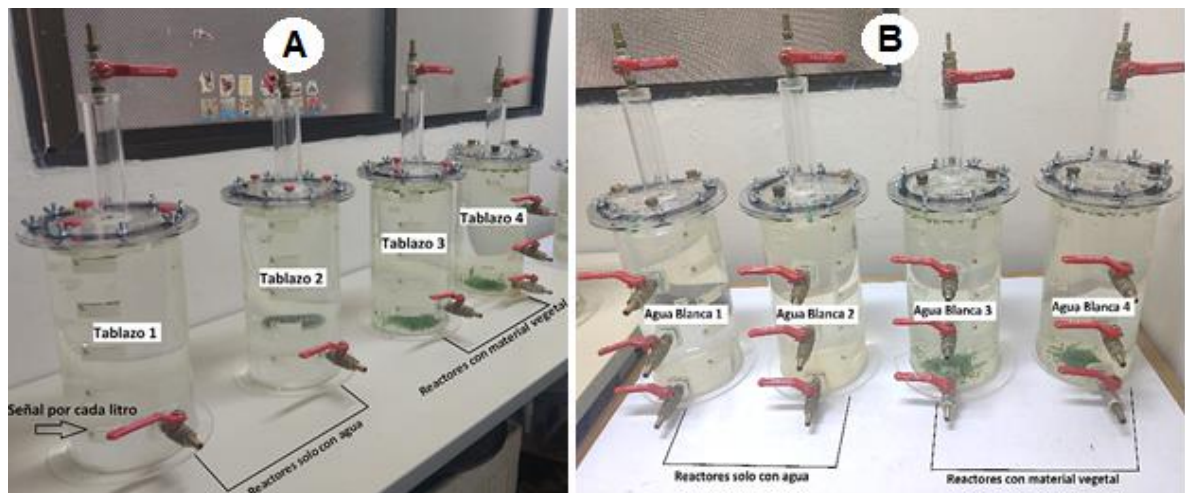
La degradación de materia orgánica de las muestras de agua se efectuó mediante dos procesos, uno biótico o biológico de carácter anaerobio y otro abiótico químico específicamente mediante hidrólisis. Los diferentes ensayos experimentales fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio GDCON de la Universidad de Antioquia.

3.2.1 Montaje de reactores biológicos. El primer paso fue realizar el montaje de ocho reactores, cuatro de ellos con agua del punto de muestreo Tablazo y los otros cuatro con agua del punto Agua Blanca (Figura 3), dichos recipientes fueron llenados litro por litro con su respectiva muestra hasta llegar a cinco litros, cada litro fue debidamente marcado sobre la pared del reactor para poder llevar un control de la disminución del volumen consecuencia de la extracción de agua semanal para los respectivos análisis y de esa manera evitar que los reactores quedaran sin fluido

antes de poder realizar los últimos ensayos. Una vez finalizado el primer paso se agregaron tres gramos (3 g) de material vegetal compuesto por hojas y pequeñas ramas de diferentes especies recolectadas de los suelos alrededor del embalse Topocoro y cortados en partes pequeñas de tamaño similar a dos de los cuatro recipientes de cada punto con el fin de analizar si ocurrían cambios notorios entre los que tenían solo agua con los que tenían materia orgánica agregada. Es de mencionar, que la cantidad de vegetación adicionada de tres gramos (3 g) por reactor fue basada en un estudio preliminar del laboratorio GDCON³².

Para asegurar una condición anaerobia y evitar el ingreso de aire a los reactores, se cerraron todas las válvulas con las que contaba cada uno de ellos, dichas válvulas eran abiertas el menor tiempo posible solo para extraer muestras para análisis tanto de gases como de agua.

Figura 3. A: Montaje de reactores biológicos del punto de muestreo Tablazo. B: Montaje de reactores biológicos del punto de muestreo Agua Blanca.



³² PEÑUELA MESA, Gustavo. [Reunión]. Agosto 2018.

3.2.2 Montaje de reactores en batch. Se realizó una experimentación en operación discontinua con el objetivo de analizar diariamente el comportamiento del agua referente a la primera semana en ambos puntos de muestreo, utilizando ocho botellas de vidrio ámbar con tapas plásticas modificadas, estas tapas tenían en el centro un orificio del tamaño justo de la manguera que se insertaba para la extracción del agua con el fin de evitar la entrada de oxígeno y mantener un ambiente anaerobio, dichos orificios eran destapados solo al momento de extraer muestras.

3.2.3 Montaje de reactores para hidrólisis. Para el estudio de la degradación del agua del embalse mediante hidrólisis, se procedió a hacer el montaje de los reactores en cuatro botellas de vidrio ámbar, dos por cada punto de muestreo con valores de pH 5 y pH 9, dichos valores de pH fueron tomados por corresponder a los valores mínimo y máximo de pH encontrados en Topocoro en las jornadas de muestreo. Es de mencionar que el pH en el agua del embalse tiende a ser neutro, con valores promedio entre 6 y 8.

Como primer paso, las botellas sin muestra fueron esterilizadas en una autoclave mediante calor húmedo con el fin de eliminar posibles microorganismos que pudiesen interferir en los resultados. Una vez desinfectadas, fueron llenadas dos de ellas con agua de Tablazo y las dos restantes con fluido de Agua Blanca hasta tener un volumen de un litro cada una.

Finalmente, con los reactores llenos y esterilizados a temperatura ambiente, se midió el pH inicial de cada litro obteniendo valores entre pH 7 y pH 8. La estabilización del agua a los valores correspondientes se realizó agregando ácido sulfúrico (H_2SO_4) a las muestras por acidificar e hidróxido de sodio (NaOH) a las muestras por alcalinizar.

3.3 PARÁMETROS Y MEDICIONES DE LABORATORIO

Los diferentes parámetros de seguimiento para los tres tipos de montajes anteriormente mencionados se clasifican en la Tabla 1. según la frecuencia de las tomas de muestras.

Tabla 1. Monitoreo de reactores y parámetros de medición.

Parámetros	Reactores		
	Biológicos	Batch	Hidrólisis
Oxígeno disuelto (<i>mg/L</i>)	✓		
Potencial redox (<i>mV</i>)	✓		
pH	✓		
Conductividad (<i>μs/cm</i>)	✓		
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (<i>mg O₂/L</i>)	✓	✓	✓
Carbono Orgánico Disuelto (COD) (<i>ppm</i>)	✓		
Sólidos Totales (ST) (<i>mg/L</i>)	✓		
Sólidos Totales Volátiles (STV) (<i>mg/L</i>)	✓		
Dióxido de Carbono (CO ₂) (<i>ppm</i>)	✓		
Metano (CH ₄) (<i>ppm</i>)	✓		

Frecuencia de toma de muestras: ✓ Diario ✓ Día por medio ✓ Semanal ✓ Quincenal

3.3.1 Reactores biológicos. Los análisis para los reactores biológicos se clasificaron en dos grupos según la frecuencia con la que se tomaban las muestras, en el primer grupo se tomaban muestras semanalmente de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y parámetros in situ tales como: análisis de oxígeno disuelto, potencial redox, conductividad y medición de pH, y en el segundo grupo con una frecuencia aproximada de dos semanas se analizaban los parámetros; sólidos totales, sólidos volátiles, Carbono Orgánico Disuelto (COD) y cuantificación de gases metano y dióxido de carbono que requerían de un proceso de análisis en

laboratorio más elaborado y además requerían de una mayor cantidad de extracción de muestra para su estudio.

Para un tiempo cero, se realizaron todos los análisis anteriormente mencionados, excepto la cuantificación de gases debido a que las emisiones de metano y dióxido de carbono comienzan a producirse una vez inician los procesos de degradación, es por esto que dicha cuantificación se empezó a realizar a partir del día trece junto con el resto de los parámetros.

El periodo total de los análisis de laboratorio fue de aproximadamente siete meses, de los cuales los primeros cuatro meses se realizaron evaluaciones de todos los parámetros con las frecuencias ya descritas y del cuarto mes en adelante se hicieron análisis únicamente de DQO y de los parámetros correspondientes al grupo dos de manera aleatoria, con el fin de llevar un control de posibles cambios por un periodo más extenso. El análisis de los parámetros in situ no se estudiaron por un lapso más largo puesto que durante los primeros cuatro meses las tendencias de estos fueron constantes.

Las mediciones de los parámetros in situ se realizaron mediante diversos dispositivos, un equipo multiparámetro HQ40d para medir el oxígeno disuelto, un conductímetro WTW 3210 para las lecturas de conductividad y un pHmetro WTW pH 7110 con el cual se podían leer valores de pH y de potencial redox.

El análisis de la DQO se realizó siguiendo el método de reflujos cerrado/colorimetría de acuerdo con el procedimiento establecido en el Standard Methods 5220D con la diferencia que dicho proceso se realizó utilizando un kit Test 0-27 06.16 DQO 40 Macherey-Nagel en el cual los reactivos dicromato potásico, ácido sulfúrico y sulfato de plata ya se encuentran predosificados.

La determinación de COD se llevó a cabo mediante el método de combustión a alta temperatura 5310 B del Standard Methods en el cual se cuantifica el dióxido de carbono generado después de someter las muestras a combustión. El primer paso del proceso fue filtrar cada una de las muestras mediante un filtro de 0,45 μm compuesto por membrana de Nylon en viales de 40 mL, dichos filtrados eran preservados con ácido fosfórico (H_3PO_4) a un $\text{pH} < 2$ para ser leídos posteriormente en un analizador de carbono orgánico total Apollo 9000.

El cálculo de Sólidos Totales (ST) se realizó mediante el método 2540 B del Standard Methods, dicho proceso parte de la adición de la muestra (20 mL) en cápsulas de porcelana de 100 mL previamente pesadas en una balanza analítica. Una vez agregada la solución bien mezclada en la porcelana, era evaporada en un equipo de baño de maría y posteriormente secada en una estufa Universal Memmert por dos horas a 105°C para asegurar que se retirara la humedad de la muestra en su totalidad. Teniendo los valores de los pesos constantes registrados se calculaba el valor de ST en mg/L.

Las mismas cápsulas obtenidas del proceso de ST, eran incineradas en una mufla D8 Terrígeno a 550°C por una hora, la pérdida de peso por ignición correspondía a los Sólidos Volátiles Totales (SVT).

Por último, la cuantificación de metano y dióxido de carbono se realizó mediante cromatografía gaseosa en un cromatógrafo de gases Agilent 7890B con control electrónico de presión y detectores FID, Metanizador, μECD . Las muestras de gases fueron recolectadas en bolsas Tedlar de 0,25 litros de volumen, las cuales eran llenadas mediante una bomba de extracción de gases que a su vez estaba conectada por una manguera a las válvulas superiores de cada reactor, que eran abiertas solo en el momento exacto de dicha recolección.

3.3.2 Monitoreo de reactores Batch. El seguimiento de los reactores batch se realizó analizando la DQO diariamente por un periodo de nueve días para estudiar con mayor detenimiento lo sucedido en la primera semana de puesta en marcha de los reactores biológicos, dado que los valores entre el día cero y la primera fecha de análisis tuvieron una amplia diferencia.

3.3.3 Monitoreo de reactores con hidrólisis. Para analizar la degradación de la materia orgánica mediante hidrólisis, se realizó un seguimiento únicamente de DQO día por medio por un periodo de nueve días.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 REACTORES BIOLÓGICOS ANAEROBIOS

4.1.1 Caracterización inicial. Se realizaron análisis de las muestras de los dos puntos de muestreo con el fin de evaluar las condiciones iniciales del agua y de esta forma identificar la influencia de estas mismas sobre la digestión anaerobia (Tabla 1).

Tabla 2. Caracterización inicial de las muestras

Parámetros	Puntos de muestreo	
	Tablazo	Agua Blanca
Oxígeno disuelto (mg/L)	7,415	7,5
Potencial Redox (mV)	182,5	180,7
pH	8,085	8,238
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	191,3	220,5
DQO (mg O ₂ /L)	16	10
COD (ppm)	39,163	33,367
Sólidos totales (mg/L)	117	148
Sólidos totales volátiles (mg/L)	20	24

En la tabla 1 al comparar Tablazo y Agua Blanca, se observan valores muy similares en todos los parámetros, excepto los valores de conductividad, ST y SVT, que muestran una diferencia un poco mayor para Agua Blanca, esto debido a que en este punto de muestreo existe mayor presencia de aguas residuales.

En términos generales, los parámetros oxígeno disuelto, potencial redox y conductividad para ambos puntos de muestreo indican una buena calidad del agua para el consumo humano en términos de análisis fisicoquímicos, según la resolución

número 2115 de 2007. Los valores de DQO, COD y sólidos muestran la presencia de carga orgánica que servirá de sustrato para los microorganismos propios del embalse presentes en las muestras, y el pH cerca a la neutralidad tanto para Tablazo como para Agua Blanca también favorece el desarrollo del proceso de degradación anaerobia.

4.1.2 Parámetros in situ. En la tabla 2 se presentan los valores promedios con desviación estándar de cada parámetro in situ correspondiente a cada reactor con el fin de estudiar su variabilidad durante los 142 días de ensayos.

Tabla 3. Parámetros in situ con desviación estándar.

Reactores	Parámetros			
	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Redox (mV)
Tablazo 1*	6,33 \pm 0,34	7,47 \pm 0,32	203,34 \pm 4,80	159,41 \pm 27,90
Tablazo 2*	5,99 \pm 0,47	7,28 \pm 0,34	206,25 \pm 5,84	157,88 \pm 37,82
Tablazo 3**	2,54 \pm 1,54	6,76 \pm 0,35	251,61 \pm 23,95	-76,92 \pm 113,50
Tablazo 4**	3,78 \pm 1,72	7,38 \pm 0,30	237,78 \pm 16,29	34,43 \pm 132,80
Agua Blanca 1*	6,39 \pm 0,45	7,78 \pm 0,29	230,56 \pm 4,42	113,79 \pm 36,19
Agua Blanca 2*	6,56 \pm 0,35	7,83 \pm 0,26	227,97 \pm 4,51	131,09 \pm 41,70
Agua Blanca 3**	4,15 \pm 1,73	7,65 \pm 0,55	273,85 \pm 18,40	65,45 \pm 126,61
Agua Blanca 4**	4,36 \pm 1,79	7,36 \pm 0,51	272,56 \pm 21,59	90,29 \pm 109,29

*Reactores solo con agua ** Reactores con agua y material vegetal

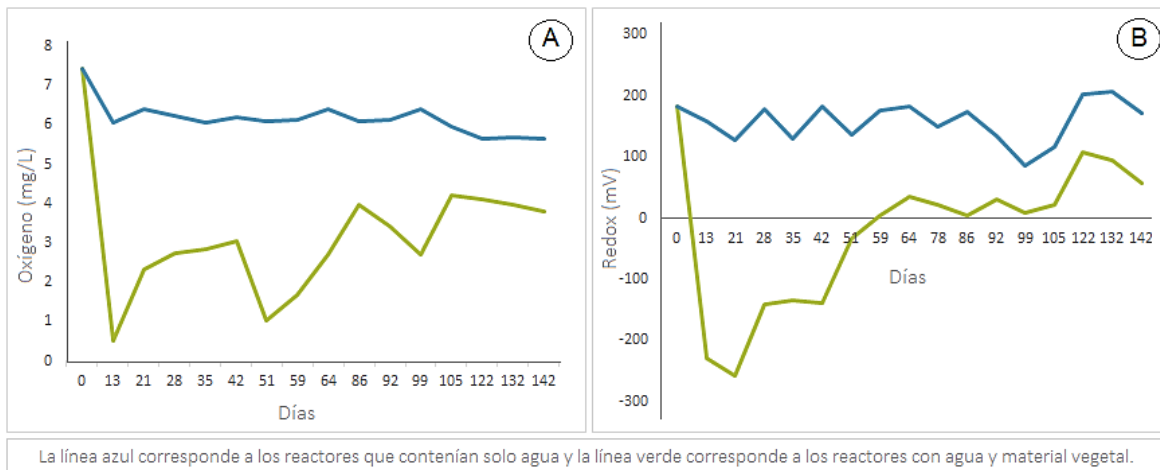
Al analizar los valores de la tabla 2 se observa que la diferencia de los parámetros in situ de Agua Blanca sobre los de Tablazo son ligeramente más altos, debido a la composición del agua en cada punto de muestreo.

El parámetro con mayor estabilidad durante todo el periodo de ensayos para todos los reactores fue el pH, el cual mantuvo valores cercanos a los valores óptimos (6,6 ~7,6)³³ para el desarrollo de una degradación anaerobia eficiente.

En cuanto al oxígeno disuelto, conductividad y potencial redox se evidencia una mayor desviación estándar respecto a la media en aquellos reactores que presentaban material vegetal, es decir, que la presencia vegetal tuvo influencia en el comportamiento de dichos parámetros in situ.

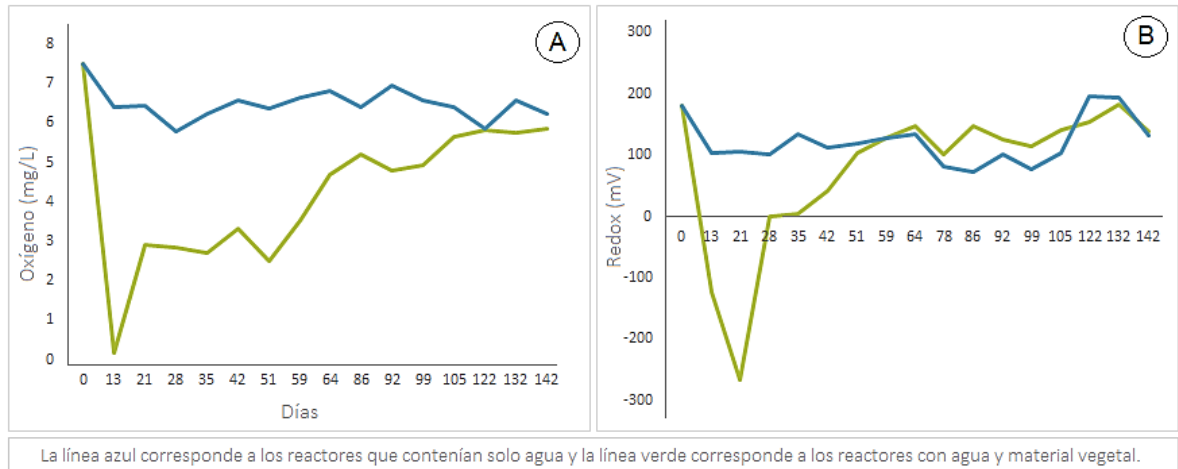
Por otra parte, con el fin de analizar de manera más específica el comportamiento de las variables oxígeno disuelto y potencial redox, las figuras 4 y 5 muestran los resultados obtenidos durante el tiempo de estudio para los reactores con material vegetal y los reactores que solo tenían agua en los dos puntos de muestreo.

Figura 4. A: Oxígeno disuelto para Tablazo. B: Potencial Redox para Tablazo.



³³ LORENZO ACOSTA, Yaniris y OBAYA ABREU, Ma Cristina. Op. Cit.

Figura 5. A: Oxígeno disuelto para Agua Blanca. B: Potencial Redox para Agua Blanca.



De las figuras 4 y 5 se observa que tanto Tablazo como Agua Blanca con material vegetal presentan su valor mínimo de oxígeno disuelto hacia la segunda semana de ensayos y el valor del potencial redox más negativo hacia la tercera semana, demostrando que las mejores condiciones para la degradación anaerobia se presentaron entre la segunda y tercera semana del periodo de análisis. Por otro lado, los reactores de ambos puntos de muestreo que contenían solo agua mostraron un comportamiento con tendencia estable.

4.1.3 Degradación de materia orgánica. En las figuras 6 y 7 se presenta la degradación de materia orgánica para los parámetros DQO, COD y SVT en cada punto de muestreo.

Figura 6. A: DQO para Tablazo. B: COD para Tablazo. C: SVT para Tablazo.

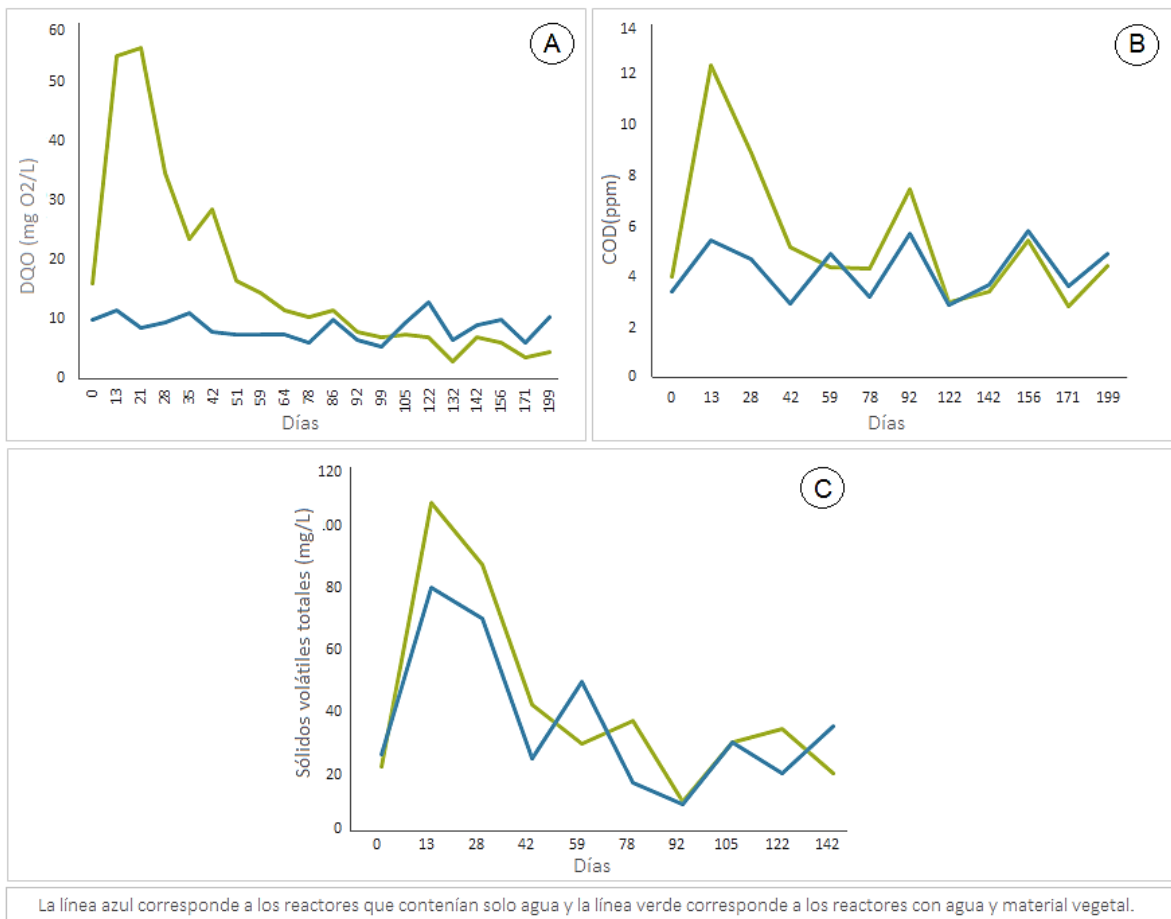
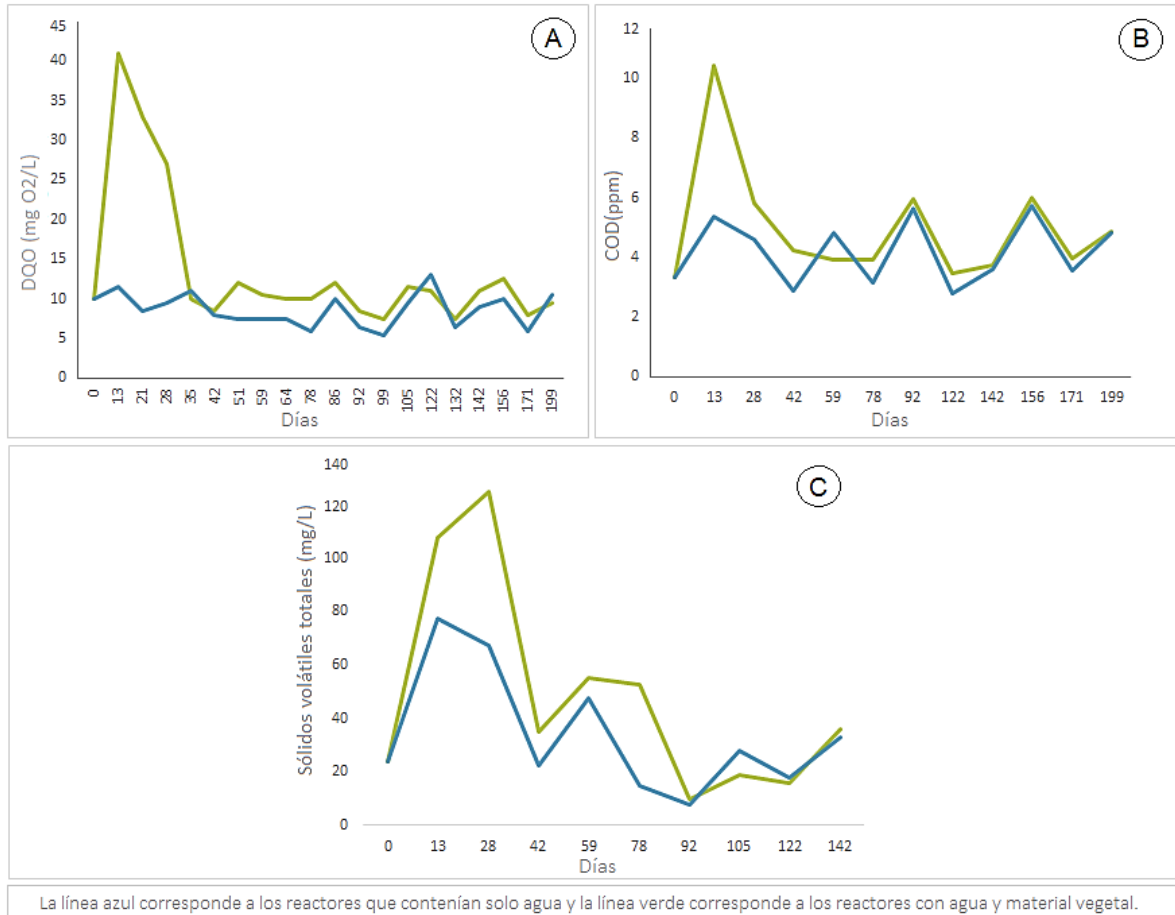


Figura 7. A: DQO para Agua Blanca. B: COD para Agua Blanca. C: SVT para Agua Blanca.



Los tres parámetros, DQO, COD y SVT en los reactores con material vegetal muestran valores máximos de materia orgánica hacia la segunda semana de estudio, dicho pico representa el rompimiento de las moléculas de la materia agregada que después son consumidas como alimento por los microorganismos presentes en el agua, logrando de esta forma una disminución de dicha carga orgánica con el tiempo.

Para analizar porcentualmente la degradación de la materia orgánica presente en el agua, se calculó para los reactores con solo agua la variación porcentual en base al día cero de ensayos, mientras que, para los reactores con material vegetal, no solo se calculó la variación en base al día cero, sino que también se calculó en base al valor máximo de DQO, COD o SVT que representa el valor de materia orgánica después de la ruptura de moléculas como se muestra en la tabla 3.

Tabla 4. Porcentajes máximos de degradación reactores biológicos

Muestras	Máximo porcentaje de degradación					
	Con base al día cero			Con base al valor máximo		
	DQO	COD	SVT	DQO	COD	SVT
Tablazo*	69%	36%	75%	-	-	-
Tablazo **	81%	29%	55%	95%	77%	91%
Agua Blanca*	45%	16%	67%	-	-	-
Agua Blanca**	25%	-4%	58%	82%	67%	92%

*Reactores solo con agua ** Reactores con agua y material vegetal

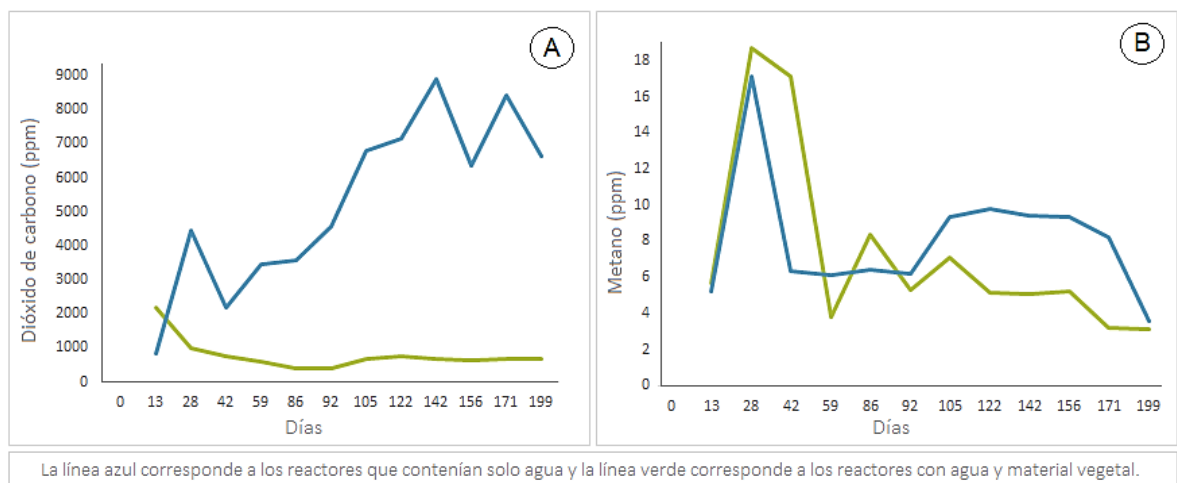
Los valores más altos de degradación con base al día cero de ensayos lo presentan los reactores que contenían solo agua, debido a que había una menor cantidad de materia orgánica por descomponer, es por eso que, los reactores a los cuales se les adicionó material vegetal presentaron menores porcentajes de degradación puesto que los microorganismos requieren de más tiempo para llevar a cabo dicho proceso.

Por otro lado, al calcular la variación porcentual en base al valor máximo de cada uno de los parámetros, tanto la DQO como el COD y los SVT en ambos puntos de muestreo presentan valores altos de degradación anaerobia.

4.1.4 Dióxido de carbono y metano. Para la degradación anaerobia de materia orgánica en dióxido de carbono y metano intervienen diversos grupos de microorganismos que descomponen los grandes compuestos en otros más sencillos, dichos compuestos son consumidos por los archaeas metanogénicas para crecer y producir el biogás, todos estos procesos tienen lugar de manera simultánea en los reactores³⁴.

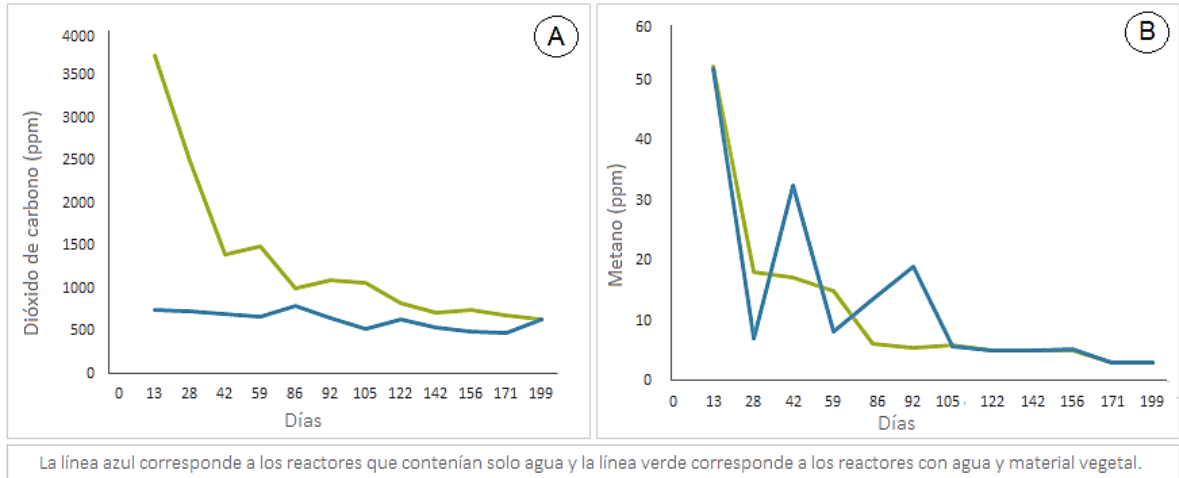
El dióxido de carbono y el metano fueron estudiados por 199 días con el fin de analizar dicha transformación de materia orgánica en gases. Se presentan a continuación los valores obtenidos por los respectivos periodos de tiempo para cada punto de muestreo (Figura 8 y 9).

Figura 8. A: CO_2 producido por Tablazo. B: CH_4 producido por Tablazo.



³⁴ PARRA HUERTAS, Ricardo Adolfo. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2015.

Figura 9. A: CO_2 producido por Agua Blanca. B: CH_4 producido por Agua Blanca.



En la degradación anaerobia la producción de CO_2 y el CH_4 depende de las sustancias de las cuales esté formado el sustrato o residual, es decir, entre más compleja sea dicha composición, se obtendrá un mayor rendimiento de biogás³⁵.

Por consiguiente, al observar las figuras 8 y 9 se evidencia una mayor producción de biogás en los reactores con material vegetal correspondientes al punto de muestreo Agua Blanca comparados con los de Tablazo, dicha diferencia se debe a que la zona de Agua Blanca presentaba una mayor carga orgánica por vertimientos de aguas residuales e inundación de tierras anteriormente utilizadas con actividad ganadera.

Por otra parte, los valores máximos de producción de gases en ambos puntos para los recipientes que contenían material vegetal se encuentran alrededor de la segunda semana de análisis, dichos reactores muestran una tendencia similar de un pico inicial que disminuye con el tiempo y a su vez, los reactores que contenían solo agua presentaron un comportamiento similar excepto Tablazo que muestra un

³⁵ LORENZO ACOSTA, Yaniris y OBAYA ABREU, Ma Cristina. Op. Cit.

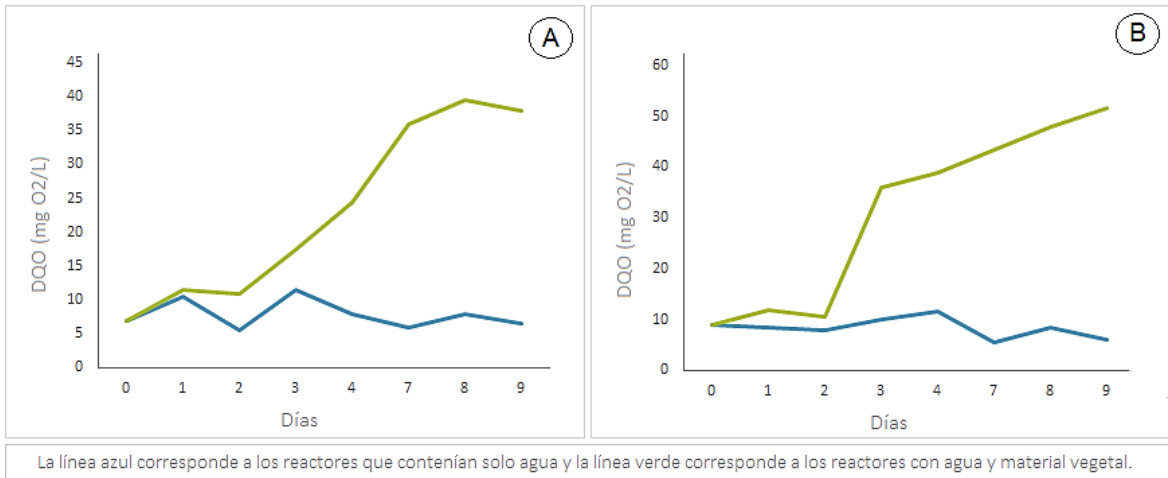
continuo incremento de CO_2 para todo el periodo de estudio. No obstante, los gases producidos en la degradación anaerobia mantienen una relación de acuerdo a la composición del residual, que generalmente oscilan entre 50% a 80% para el metano y de 20% a 50% (digestión anaerobia) para el dióxido de carbono, por lo tanto, las altas concentraciones de CO_2 en todos los reactores son consecuencia de contaminación con aire del ambiente que ingresaba al momento de la extracción de muestras tanto líquidas como gaseosas.

4.2 REACTORES BATCH

El seguimiento realizado diariamente sobre los reactores batch tenía la finalidad de analizar con mayor detenimiento el comportamiento de la degradación de los reactores biológicos para esa primera semana donde se observó una diferencia marcada entre los resultados de DQO obtenidos entre el día cero y el primer día de toma de muestras que corresponde al día trece.

Los valores diarios de DQO en los reactores batch demuestran de igual forma que hubo un continuo aumento desde el día inicial hasta el día nueve alcanzando valores de $38 \text{ mg } \text{O}_2/\text{L}$ para Tablazo y de $52 \text{ mg } \text{O}_2/\text{L}$ para Agua Blanca números muy próximos a los obtenidos en los reactores biológicos en el primer análisis que corresponden a $41 \text{ mg } \text{O}_2/\text{L}$ para Tablazo y $54 \text{ mg } \text{O}_2/\text{L}$ para Agua Blanca.

Figura 10. A: DQO para Tablazo en batch. B: DQO para Agua Blanca en batch.



4.3 HIDRÓLISIS

El proceso de hidrólisis puede tener lugar en condiciones tanto ácidas como básicas, es por ello que el seguimiento se realizó con los valores máximos y mínimos de pH encontrados en el embalse en las jornadas de muestreo y no con el valor promedio de pH del embalse que se ubica cerca a la neutralidad.

A continuación, en la tabla 4, se observan los porcentajes máximos de degradación obtenidos después de nueve días de estudio para Tablazo y Agua Blanca con pH 5 y pH 9.

Tabla 5. Porcentajes máximos de degradación por hidrólisis

Muestras	Máximo porcentaje de degradación	
	pH 5	pH 9
Tablazo	38%	40%
Agua Blanca	55%	29%

El mayor porcentaje de degradación mediante hidrólisis según la tabla 4. fue de 55% que corresponde al reactor de Agua Blanca con pH 5, sin embargo, para el punto de muestreo Tablazo, el mayor porcentaje de degradación corresponde al reactor con pH 9 con un valor de 40%. Teniendo en cuenta dichos resultados no se puede inferir qué potencial de hidrógeno es más conveniente para la degradación de materia orgánica no obstante en términos generales, se puede evidenciar una favorabilidad en los porcentajes de degradación obtenidos con este tipo de proceso.

5. CONCLUSIONES

- Los máximos porcentajes de degradación de materia orgánica corresponden a los reactores solo con agua, es decir que la velocidad de descomposición se ve afectada por la cantidad de carga orgánica, debido a que dicho proceso le toma más tiempo a los microorganismos que se encuentran presentes en el agua. No obstante, a nivel general los porcentajes máximos de degradación obtenidos para ambos puntos de muestreo son valores favorables, teniendo en cuenta que no hubo un control del inóculo, puesto que se trabajó con las bacterias propias del embalse, ni tampoco un control estricto de las condiciones que favorecen el proceso tales como potencial redox, temperatura y control de entrada de oxígeno.
Por otra parte, las emisiones más altas de los gases CO₂ y CH₄ fueron para los reactores de Agua Blanca, dichos valores sustentan que entre más complejo es el residual o sustrato, mayores emisiones de biogás se liberan mediante la digestión anaerobia.
- En el proceso de hidrólisis los diversos compuestos que se encuentran diluidos en el agua pueden reaccionar de acuerdo a la acidez del medio, sin embargo, con los resultados obtenidos no se pudo concluir si un pH ácido o alcalino favorecía la degradación de materia orgánica, no obstante, los porcentajes de degradación para el corto tiempo de análisis fueron favorables.
- Los resultados obtenidos tanto del proceso biótico como del proceso abiótico demuestran que para ambos casos hubo una degradación de materia orgánica, es decir, que con las condiciones del embalse, puede darse dicha degradación por medio de los dos procesos, sin embargo, el rendimiento de una u otra técnica para aplicarla a otro proceso de descomposición de materia orgánica dependerá

tanto de las condiciones del residual como del control que se tenga sobre las diferentes variables que pueden afectar ambas técnicas.

BIBLIOGRAFÍA

BACCA GARCÍA, Javier Orlando. Análisis de la viabilidad de la hidroelectricidad en Colombia. 2019. Bogotá D.C. : Universidad Nacional de Colombia, 2019.

BAMBACE, L. A. *et al.* Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams. ELSEVIER. 2007.

BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2007.

BRUCE, Forsberg. La Represa Inambari – Gases de Efecto Invernadero (GEI). Wildlife conservation society, 2013.

BURGOS RAMÍREZ, Landy Irene, *et al.* Demanda Química de Oxígeno de Muestras Acuosas. México D.F : UNAM Facultad de Química, 2008.

BUSTAMANTE FERNÁNDEZ, Carlos Arturo. Efectos ambientales generados por la construcción y operación de un embalse. Sincelejo. Universidad de Sucre, 2008.

CANCHALA, Teresita del Rocío. Generación de gases de efecto invernadero en los sedimentos de un humedal natural eutrofizado. Influencia de nutrientes N y P. Santiago de Cali, Universidad del Valle, 2014.

CENTRO DE CONTAMINACIÓN Y QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA (CECONT), INSTITUTO DE METEOROLOGÍA (INSMET). Gases de efecto invernadero: Conceptos básicos. [En línea]. Cuba. Disponible en: <http://www.insmet.cu/emisiones/pdf/Conceptos%20b%C3%A1sicos.pdf>

CORRALES, Lucía Constanza, *et al.* Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. Bogotá. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, 2015.

CORREA BRAVO, Jefferson. Emisiones de gases de efecto invernadero en el humedal natural El Madrigal. Santiago de Cali. Universidad del Valle, 2016.

DEMARTY, M. y BASTIEN, J. Emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 year of CH₄ emissions measurements. s.l. : ELSEVIER, 2011.

FRANQUET BERNIS, Jose María. ¿Qué es un embalse y para qué sirve? Agua que no has de beber: 60 respuestas Plan Hidrológico Nacional. 2010, págs. 22-30.

GONZÁLES, A. 2009. Hidrólisis. 2009.

GRUPO DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN (GDCON). Variación espacio-temporal de las emisiones netas de gases de efecto invernadero desde el pre-llenado hasta el post-llenado del proyecto hidroeléctrico Sogamoso. Medellín . Universidad de Antioquia, 2016.

HERNÁNDEZ, María Elizabeth. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. Veracruz .SciELO, 2009.

IPCC. Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Banco Mundial. 2001.

IPCC. Cambio Climático 2007: Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, 2007.

IPCC. Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Experto Sobre el Cambio Climático. 2011.

ISAGEN. Central Hidroeléctrica Sogamoso [Sitio web]. Disponible en: <https://www.isagen.com.co/es/nuestro-negocio/generamos-energia#central-hidroelectrica-sogamoso>.

ISAGEN. CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOGAMOSO, UNA MEGAOBRA PARA LA REGIÓN Y EL PAÍS. [SITIO WEB]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=SV65FFOBYW4&AB_CHANNEL=ISAGEN](https://www.youtube.com/watch?v=SV65FFOBYW4&AB_CHANNEL=ISAGEN).

LOAIZA MERA, Sandra Patricia. Cuantificación de gases de efecto invernadero generados en represa y embalses tropicales: caso Calima. Valle del Cauca, 2016.

LORENZO ACOSTA, Yaniris y OBAYA ABREU, Ma Cristina. La Digestión Anaerobia. Aspectos teóricos. Parte 1. La Habana: Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), 2005.

CRUZ, Arturo y FRANCO, Jerónimo. Los embalses de presas como una fuente de gases de efecto invernadero: Una estimación de su emisión. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2008.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MINAMBIENTE). Gases Efecto Invernadero. [Sitio web]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/462-plantilla-cambio-climatico-18Naciones Unidas>. 2019. Noticias ONU. [En línea] Naciones Unidas, 25 de 11 de 2019.

NASA's Jet Propulsion Laboratory. Climate Change: How Do We Know? [En línea] Earth Science Communications Team, 21 de 12 de 2019.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA. UNESCO NEWS. [Sitio web]. [Consulta: 21 10 2020]. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-6-hydropower/>.

ORTIZ, Josimar. Validación del método de análisis para la cuantificación de carbono orgánico disuelto en aguas marinas por combustión catalítica con detección mediante infrarrojo no dispersivo (IRND). San Juan de Pasto. Universidad de Nariño, 2015.

PALAU, Antoni. y PRIETO, Clemente. Hidroelectricidad, embalses y cambio climático,» Fundación para el fomento de la ingeniería del agua. 2009.

PAOLINI, Jorge. Carbono orgánico disuelto y particulado en grandes rios de la América del Sur. Mérida .1990.

PARRA HUERTAS, Ricardo Adolfo. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2015.

PAUCAR SAMANIEGO, Mayra Alejandra y AMANCHA PROAÑO, Pablo. Estudio de emisiones de metano producidas por embalses de las centrales hidroeléctricas en Ecuador. 12º Congreso Iberoamericano De Ingeniería Mecánica. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2014.

PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio [Reunión]. Agosto de 2018.

PULIDO GUIO, Anda Derly, *et al.* Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Colombia. IDEAM, 2015.

RUBIO CLEMENTE, Ainhoa; CHICA ARRIETA, Edwin Lenin y PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio. Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes, Universidad de Antioquia- Laboratorio GDCON. Medellín.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA UDEA. Ingenia UdeA [Sitio web]. 2018. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=G6IPrD7VDKQ&ab_channel=IngeniaUdeA

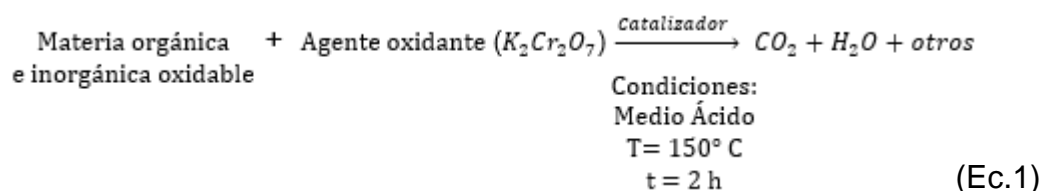
UNIVERSIDAD NACIONAL. 2016. Embalses también emiten gases de efecto invernadero. [En línea] Unimedios, 17 de agosto de 2016. <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/embalses-tambien-emiten-gases-de-efecto-invernadero.html>.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO UNAM. Biología 2: ¿Qué son los factores abióticos y bióticos? [En línea]. <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia2/unidad2/abioticosbioticos/queson>.

ANEXOS

Anexo A. DETERMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA PRESENTE.

Demanda Química de Oxígeno. La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro químico de medición que indica la cantidad de oxígeno mgO_2/L requerido para la oxidación completa de toda la materia orgánica (bien sea de naturaleza biológicamente biodegradable o no oxidable biológicamente)³⁶ presente en una muestra por un agente químico fuerte como el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) bajo condiciones ácidas como se expresa en la Ecuación 1.



La prueba de DQO es utilizada para medir el grado de contaminación que puede tener un cuerpo de agua, dicho análisis se realiza en el laboratorio mediante reflujo cerrado, calentando las muestras en un termoreactor por dos horas a 150°C de temperatura. Una vez enfriadas, se hace la lectura final mediante un espectrofotómetro.

La ventaja más significativa de la DQO es el poco tiempo que se requiere para la evaluación. La determinación se puede realizar en 3 horas aproximadamente a diferencia de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) que precisa de 5 días, por esta razón en muchos casos se utiliza como sustituto de la DBO_5 ³⁷.

³⁶ BURGOS RAMÍREZ, Landy Irene, *et al.* Demanda Química de Oxígeno de Muestras Acuosas. México D.F : UNAM Facultad de Química, 2008.

³⁷ UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA UDEA. Ingenia UdeA [Sitio web]. 2018. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=G6IPrD7VDKQ&ab_channel=IngeniaUdeA

Carbono Orgánico Disuelto. El Carbono Orgánico Total (COT) es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico y se mide por la cantidad de dióxido de carbono que se genera al oxidar la materia orgánica. Este parámetro es frecuentemente utilizado como un indicador no específico de la calidad del agua.

El Carbono Orgánico Disuelto (COD) es la fracción del COT que queda en una muestra líquida < 0,45 µm después de que todo el Carbono Orgánico Particulado (COP) ha sido eliminado por filtración > 0,45 µm como se refleja en la ecuación 2.

$$\text{Carbono orgánico disuelto (COD)} = \text{Carbono orgánico total (COT)} - \text{Carbono orgánico particulado (COP)} \quad (\text{Ec.2})$$

El COD está constituido principalmente por sustancias húmicas, polisacáridos, polipéptidos y proteínas que son fuente de alimento para microorganismos heterótrofos y pueden afectar de diversas maneras las propiedades químicas del agua³⁸.

Las altas concentraciones de COD en los ecosistemas acuáticos ocasionan diferentes alteraciones como la disminución del oxígeno disuelto que impide la producción de nutrientes y el aumento de absorción de radiación solar en longitud de onda corta UV perjudicial para el crecimiento de comunidades planctónicas que son fuente de alimento para diferentes especies³⁹.

Anexo B. ECUACIONES UTILIZADAS PARA CALCULAR ST Y SVT.

$$ST = \frac{(A-B)1000}{v} \quad (\text{Ec.3})$$

³⁸ PAOLINI, Jorge. Carbono orgánico disuelto y particulado en grandes rios de la América del Sur. Mérida .1990.

³⁹ ORTIZ, Josimar. Validación del método de análisis para la cuantificación de carbono orgánico disuelto en aguas marinas por combustión catalítica con detección mediante infrarrojo no dispersivo (IRND). San Juan de Pasto. Universidad de Nariño, 2015.

ST: Sólidos Totales, en mg/L A: Peso final de la cápsula con el residuo seco, en gramos. B: Peso inicial de la cápsula vacía, en gramos. V: Volumen de muestra desecada, en litros.

$$SVT = \frac{(A-C)1000}{V} \quad (\text{Ec.4})$$

SVT: Sólidos Volátiles Totales, en mg/L A: Peso de cápsula con el residuo seco antes de ignición, en gramos. C: Peso de la cápsula con el residuo seco después de ignición, en gramos. V: Volumen de muestra desecada, en litros.