

COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE FRENTE A LOS
PROCESOS ABIÓTICOS DE FOTODEGRADACIÓN Y BIOLÓGICOS AEROBIOS
EN EL EMBALSE TOPOCORO-SANTANDER

JOHANNA ELVIRA RODRIGUEZ BALLESTEROS

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

2019

COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE FRENTE A LOS
PROCESOS ABIÓTICOS DE FOTODEGRADACIÓN Y BIOLÓGICOS AEROBIOS
EN EL EMBALSE TOPOCORO-SANTANDER

JOHANNA ELVIRA RODRIGUEZ BALLESTEROS

Trabajo de grado para optar al 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

2019

*A Dios por ser mi guía y compañía en momentos difíciles, por darme salud y calma
en momentos de tormenta.*

*A mis padres Aurora y Rubén, por su gran esfuerzo, amor y dedicación a sus hijos,
por su apoyo incondicional en todo momento a pesar de las dificultades y por ser
mi más grande motor de vida, porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible.
Los amo inmensamente.*

*A mi hermana y mi pequeño sobrinito, por brindarme siempre esa alegría y
fortaleza por salir adelante, porque a pesar de todo siempre estuvieron ahí
conmigo.*

*A mi novio, por ser mi compañía y cómplice en muchos momentos de mi vida, por
el amor brindado y soporte para nunca dejarme caer.*

*A mi querida amiga Ale, por enseñarme el verdadero significado de la amistad, por
estar ahí siempre en los momentos más difíciles con sus lindas palabras y
alegrías.*

*A Fabian por ser mi guía en la realización de este proyecto, por su paciencia y
dedicación en todo lo que hace.*

*Y Finalmente a mis amigas del GDCON Dani, Any, Pau, Pao, Estefa y Jinna, por
sus consejos, alegrías y apoyo en todo momento logrando ser una parte
importante en mi vida y con las cuales he vivido momentos muy especiales.*

Johanna Elvira Rodríguez Ballesteros

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Santander, mi alma máter, por contribuir en mi formación integral como persona.

A la Universidad de Antioquia que me brindó la oportunidad de cumplir mis objetivos propuestos para el trabajo de grado.

A mi directora Liliana del Pilar Castro Molano y mi codirectora Diana Catalina Rodríguez Loaiza por permitirme hacer parte de este gran proyecto y brindarme todos sus conocimientos.

Al Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), por el apoyo brindado durante la fase experimental de esta investigación.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 GEI.....	17
2.2 EMBALSES.....	18
2.3 EMISIONES DE GEI DESDE LOS EMBALSES	18
2.4 BIODEGRADACIÓN	20
2.5 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA	21
2.5.1 Fotólisis.....	21
2.5.2 Fotocatálisis	21
2.5.3 Fotocatálisis con reactivo fenton.....	22
2.6 MEDICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA.....	23
2.6.1 Demanda química de oxígeno	23
2.6.2 Carbono orgánico disuelto	23
3. METODOLOGÍA	24
3.1 ZONA DE ESTUDIO Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	24
3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL	26
3.2.1 Montaje de reactores aerobios.....	26
3.2.2 Degradación en simulador solar	27
3.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO	30

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
4.1 REACTORES AEROBIOS	32
4.1.1 Caracterización inicial	32
4.1.2 Parámetros in situ en los reactores.....	32
4.1.2 Degradación de la materia orgánica en los reactores.....	33
4.1.3 Correlación entre parámetros.	36
4.2 PROCESOS DE OXIDACION AVANZADA	38
5. CONCLUSIONES	40
BIBLIOGRAFÍA.....	42

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Distribución de las muestras de fotodegradación	29
Tabla 2. Caracterización agua del embalse	32
Tabla 3. Promedio parámetros In Situ	33
Tabla 4. Porcentaje de degradación	36
Tabla 5. Coeficientes de correlación entre parámetros.....	36
Tabla 6. Grado de correlación entre variables	37
Tabla 7. Análisis POA	38

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Efecto de gases invernadero.	17
Figura 2. Emisiones de GEI en embalses.	19
Figura 3. Ubicación geográfica zona de estudio	24
Figura 4. Localización estaciones de muestreo	25
Figura 5. Montaje experimental en reactores aerobios	27
Figura 6. Simulador solar SUNTEST XLS+ ATLAS	28
Figura 7. Degradación Tablazo con solo agua.....	34
Figura 8. Degradación Tablazo con material vegetal.....	34
Figura 9. Degradación Agua Blanca con solo agua	35
Figura 10. Degradación Agua Blanca con material vegetal	35

RESUMEN

TITULO: COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE FRENTE A LOS PROCESOS ABIÓTICOS DE FOTODEGRADACIÓN Y BIOLÓGICOS AEROBIOS EN EL EMBALSE TOPOCORO-SANTANDER*

AUTOR: JOHANNA ELVIRA RODRÍGUEZ BALLESTEROS**

PALABRAS CLAVES: Embalse Topocoro, biodegradación, técnicas de oxidación avanzadas.

DESCRIPCIÓN:

El embalse de Topocoro, ubicado en el departamento de Santander, perteneciente a la empresa ISAGEN, cuenta con un megaproyecto pionero en la cuantificación y control de las emisiones netas de gases de efecto invernadero, específicamente CO₂, CH₄ y N₂O durante el pre, pos y llenado del embalse. Este estudio se centra en la degradación de la materia orgánica causante, en gran medida, de estas emisiones por medio del proceso biológico aerobio y los procesos avanzados de oxidación en dos puntos de monitoreo presentes dentro del embalse.

Por lo tanto, se realizó un seguimiento de la concentración de la demanda química de Oxígeno, Carbono orgánico disuelto, sólidos totales y volátiles, dióxido de carbono, metano y parámetros in situ, para llevar un control de la operación. El contenido de materia orgánica de los reactores aerobios montados para la biodegradación varió en relación al tiempo analizado de 199 días encontrándose porcentajes de recuperación máximos de DQO del 50% al 70%, lo cual es bastante bueno, a pesar de ser un proceso espontáneo que no cuenta con la adición de ningún microorganismo, o de nutrientes para acelerar este proceso, a diferencia de los procesos de oxidación avanzada, que fueron tomados como control y referencia del porcentaje máximo que se puede alcanzar con métodos biológicos, obteniéndose porcentajes aproximados de recuperación de DQO del 88% al 100% de los tres métodos analizados que fueron la fotólisis, la fotocatalisis y el fotofenton.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora Liliana del Pilar Castro Molano, Ingeniería Química PhD.

ABSTRACT

TITLE: BEHAVIOR OF SOLUBLE ORGANIC MATTER CONCERNING TO ABIOTIC PHOTODEGRADATION AND AEROBIC BIOLOGICAL PROCESSES IN THE TOPOCORO-SANTANDER RESERVOIR*

AUTHOR: JOHANNA ELVIRA RODRÍGUEZ BALLESTEROS**

KEYWORDS: Topocoro reservoir, biodegradation, advanced oxidation techniques.

DESCRIPTION:

The Topocoro reservoir, located in the department of Santander, belonging to the company ISAGEN, has a pioneering megaproject in the quantification and control of net emissions of greenhouse gases, specifically CO₂, CH₄ and N₂O during the pre, post and filling of the reservoir. This study focuses on the degradation of the organic matter causing, to a large extent, these emissions through the aerobic biological process and the advanced oxidation processes at two monitoring points inside the reservoir.

Therefore, a follow-up was made of the concentration of the chemical demand for Oxygen, dissolved organic carbon, total and volatile solids, carbon dioxide, methane and parameters in situ, to carry out a control of the operation. The organic matter content of the aerobic reactors mounted for biodegradation, varied in relation to the analyzed time of 199 days, with maximum recovery percentages of chemical demand for Oxygen from 50% to 70%, which is quite good, despite being a spontaneous process that does not have the addition of any microorganism, or nutrients to accelerate this process, unlike the advanced oxidation processes, which were taken as control and reference of the maximum percentage that can be reached with biological methods, obtaining approximate percentages of recovery of chemical demand for Oxygen from 88% to 100% of the three methods analyzed that were photolysis, photocatalysis and photofenton.

* Degree work.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Liliana del Pilar Castro Molano, Doctor in Chemical Engineering.

INTRODUCCIÓN

La energía hidroeléctrica sigue siendo la energía renovable más utilizada en todo el mundo. Se estima que un 20% de la energía eléctrica consumida a nivel mundial es de origen hidroeléctrico, mientras que en los países en desarrollo este porcentaje se eleva hasta un 33%. Comparada con otras energías renovables como la energía solar o la eólica estos porcentajes son significativos, dado que, del total de la producción renovable mundial, el 90% tiene su origen en la hidrogenación¹. Sin embargo y a pesar de considerarse una energía “limpia”, en los últimos años los estudios sobre las emisiones de gases de efecto invernadero desde las hidroeléctricas han demostrado que estas pueden emitir hasta 3,6 veces más gases invernadero que los generados por los combustibles fósiles². Esta situación ha generado cuestionamientos ambientales válidos y preocupación por la contribución de estos cuerpos de agua al cambio climático global.

A la fecha existe un vacío en el estudio de los procesos físicos, biológicos y químicos que tienen influencia en la generación de GEI a partir de condiciones como: las características específicas del lugar, la calidad de las aguas que allí existen, las especificaciones del diseño del embalse, el efecto de la biomasa y los sumideros de carbono inundados, los cuales son la fuente primaria para la producción de carbono y nitrógeno en el cuerpo de agua³. Debido a esto, la aplicación de procesos de transformación ambiental en embalses ha sido un objeto de estudio en los últimos años, sin embargo, algunos tratamientos aún continúan como pruebas piloto en

¹ PAUCAR SAMANIEGO, Mayra Alejandra. Estudio de emisiones de metano producidas por embalses en centrales hidroeléctricas en Ecuador. Tesis de Magíster en Ingeniería de la Energía. Santiago: Pontificia Universidad católica de Chile. Escuela de Ingeniería, 2014, 13p.

² FEARNSIDE, Philip M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam. En: *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change*. 2005, vol.10, no.4, p. 675-691.

³ GRUPO DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN. Variación espacio-temporal de las emisiones netas de gases de efecto invernadero desde el pre-llenado hasta el post-llenado del proyecto hidroeléctrico Sogamoso. Informe durante el post-llenado del embalse. Medellín: GDCON; 2016.

laboratorios con agua recolectada de embalses⁴. Algunos de los métodos comúnmente estudiados consisten en aumentar la eficiencia de algunos procesos de degradación natural tales como la fotodegradación, en la cual además de la irradiación se utilizan agentes generadores de radicales hidroxilo y catalizadores metálicos conocidos como tecnologías avanzadas de oxidación⁵, que aseguran oxidaciones casi completas de la materia orgánica. De igual forma el empleo de aireadores, los cuales tienen como función principal aumentar la eficiencia de los procesos de oxidación y servir como aceptores de electrones aportando oxígeno para los procesos de degradación aerobios en embalses⁶.

Estos estudios se centran en el tratamiento de la biomasa después de la inundación donde se producen más gases de efecto invernadero gracias a que la materia orgánica procedente de la descomposición natural y de la descarga antropogénica, pasa por procesos de transformación dominantes tales como la biodegradación, foto-degradación, hidrólisis química y/o procesos de óxido-reducción, sumándose a esto, que las descargas de materia orgánica no son transformadas eficientemente debido a que los tiempos de retención en ocasiones no son suficientes para la interacción entre los microorganismos y el sustrato⁷, además el material de origen alóctono no se transforma completamente y los compuestos parentales y subproductos pueden transportarse hasta las plantas de potabilización⁸, en el caso de los embalses empleados para este fin. Es así como la materia orgánica termina convirtiéndose en una problemática para las hidroeléctricas.

⁴ RAMOS, Carlos D. y NARVÁEZ, Jhon F. Control químico y biológico de materia orgánica en embalses. *Tratamiento Avanzado de aguas*. Medellín: GAIA; 2010.

⁵ BURROWS, H., *et al.* Reaction pathways and mechanisms of photodegradation of pesticides. En: *Journal of photochemistry and photobiology B: Biology*. 2002, vol. 67, no. 2, p. 71-108.

⁶ PIRKLE, R.S., JACK, J.D. y BUKAVECKAS, P.A. Reduction in Trihalomethane Formation Potential through Air Oxidant. En: *Environmental Informatics Archives*. 2006, vol. 4, p. 273-279.

⁷ RAMOS, Carlos D. y NARVÁEZ, Jhon F. Op. cit.

⁸ STACKELBERG, P., *et al.* Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water-treatment plant. En: *Science of The Total Environment*. 2004, vol. 329, no. 1-3, p. 99-113.

Tomando en cuenta lo anterior, se evidencia la importancia del análisis del comportamiento de la materia orgánica frente a los procesos de degradación para lograr disminuir esta carga presente en el embalse que está generando emisiones de gases de efecto invernadero, importante al momento de asegurar una buena calidad del aire sin crear alteraciones medioambientales que ponen en peligro nuestro ecosistema y nuestra salud, además de lograr en un futuro que esta energía sea considerada de nuevo como totalmente renovable.

De esta manera en el presente trabajo se analizan dos técnicas de degradación en el embalse Topocoro ubicado en el departamento de Santander, las cuales son la degradación biológica aerobia y la fotodegradación, con el fin de comparar y evaluar cuál de estos resulta más eficiente para la degradación de esta materia orgánica. Logrando que en un futuro se pueda aplicar alguna de estas técnicas a todos los embalses y conseguir una disminución de gases de efecto invernadero significativas para el medio ambiente.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de la materia orgánica frente a los factores que intervienen en su degradación a partir de la fotodegradación y el proceso biológico aerobio en el embalse Topocoro.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de degradación en reactores aerobios simulando las condiciones presentes en el embalse Topocoro y cuantificándolos a partir de mediciones in situ y análisis en el laboratorio.
- Comparar el porcentaje de degradación de la materia orgánica a partir de los ensayos realizados de fotodegradación y el proceso biológico aerobio.
- Realizar una correlación entre los parámetros más representativos encontrados en los reactores aerobios con el fin de determinar su influencia y cambio frente a dichas variables.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GEI

Los gases de efecto invernadero (GEI) o gases de invernadero son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes; esta propiedad es la que produce el efecto invernadero. En la atmósfera de la Tierra, los principales GEI son: el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). Hay además en la atmósfera una serie de GEI creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro, bromo, flúor y carbono⁹.

Figura 1. Efecto de gases invernadero.



Fuente: VOA NOTICIAS. Los gases de efecto invernadero vuelven a batir un récord. [En línea]. Noviembre 2015. [Consultado el 12 de Octubre 2018]. Disponible en: <https://www.voanoticias.com/a/cambio-climatico-gases-efecto-invernadero-baten-recordf/3049879.html>.

⁹ BENAVIDES BALLESTEROS, Henry Oswaldo y LEÓN ARISTIZABAL, Gloria Esperanza. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. [En línea]. IDEAM. Diciembre, 2007. [Consultado el 12 de Octubre 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.

Cabe destacar que cambios en las concentraciones de GEI en la atmósfera generan una alteración en el sistema climático terrestre, que puede ser por un aumento en las concentraciones de los gases provocando un aumento en la temperatura superficial terrestre como se ve en la figura 1, o una disminución en las concentraciones de los gases y provocando un descenso en la temperatura superficial terrestre.

2.2 EMBALSES

Un embalse es definido como una gran masa de agua que cubre una superficie terrestre, la cual ha sido modificada de acuerdo a las actividades humanas, ya sea para producir hidroelectricidad, para el abastecimiento de agua potable, para riego en la agricultura, entre otros fines¹⁰. Esta modificación del recurso hídrico puede ser llevada a cabo con la construcción de una presa que cierra parcial o totalmente el curso de un río o arroyo, cambiando completamente el régimen hidrológico del lugar, generando mayores presiones sobre precipitaciones, incrementos en pérdidas por evaporación, incremento de la vulnerabilidad en períodos de sequía prolongados, disminución del albedo del lugar y por ende mayores temperaturas en la zona, entre otras consecuencias¹¹.

2.3 EMISIONES DE GEI DESDE LOS EMBALSES

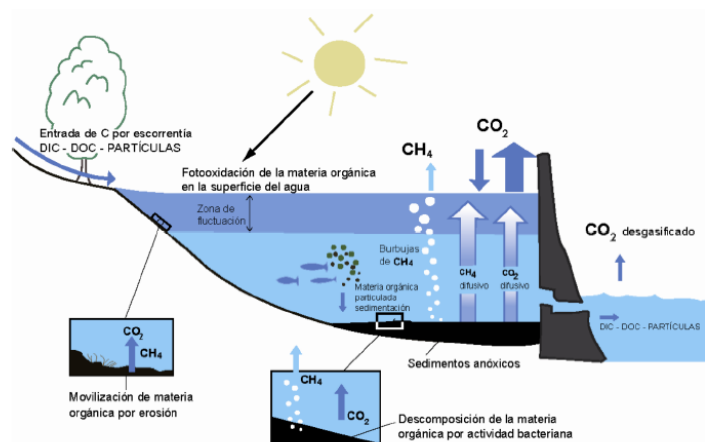
En la formación y emisión de los GEI una las cuestiones más relevantes que subyacen el tema de los embalses es la materia orgánica del suelo y la biomasa de

¹⁰ EGGLESTON, Simon, *et al.* 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [En línea]. Japón: Instituto de Estrategias Ambientales Globales (IGES), 2006 .Vol. 4. [Consultado el 15 de Octubre 2018]. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>. ISBN 4-88788-032-4.

¹¹ MEREU, S., *et al.* Operational resilience of reservoirs to climate change, agricultural demand, and tourism: A case of study from Sardinia. En: *Science of the total environment*. Junio 2015, vol. 543, p. 1028-1038. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.066.

las plantas que quedan inundadas. La descomposición de la materia orgánica sumergida libera el dióxido de carbono que se encuentra almacenado en la biomasa, el cual se combina con un ambiente anóxico que favorece también la producción de metano desde el fondo del embalse, emitiéndose posteriormente hacia la atmósfera¹². 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 se ve en la Figura 2.

Figura 2. Emisiones de GEI en embalses.



Fuente: PALAU, A., ALONSO, M. y CORREGIDOR, D. Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático. Aplicación al embalse de Susqueda (río Ter, Ne España). En: *Ingeniería del agua*. [En línea]. Septiembre 2010, vol. 17, no. 3. [Consultado el 21 de Octubre 2018]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12515/palau.pdf>.

Adicionalmente, los embalses tienden a acumular sedimentos como resultado del ingreso de material insoluble en el agua, fenómeno que es favorecido por el tamaño de partícula. El material particulado presente en la columna de agua afecta las propiedades fisicoquímicas de esta, entre ellas la penetración de la luz, lo que disminuye la zona fótica de la columna de agua y se reduce la actividad fotosintética,

¹² GALY-LACAU, Corinne, DELMAS, Robert y JAMBERT, Corinne. Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. En: *Global Biogeochemical Cycles*. [En línea]. 1997, vol. 11, no. 4, p. 471–483. [Consultado 21 Octubre 2018]. DOI: 10.1029/97gb01625.

es decir, la producción de oxígeno¹³.

2.4 BIODEGRADACIÓN

La materia orgánica por lo general constituye la fuente de energía y carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento, además de ser necesaria la presencia de otros nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, y en el caso de los sistemas aerobios, la presencia de oxígeno disuelto en el agua. En el metabolismo celular, juega un papel fundamental el aceptor final de electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica, este aspecto además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas. Atendiendo a cuál es dicho aceptor final de electrones se distinguen tres casos¹⁴:

- Sistemas aerobios: si existe oxígeno en el medio, éste será el aceptor final de electrones, lo que conlleva a que se obtengan rendimientos energéticos elevados y una importante generación de lodos, debido al alto crecimiento de las bacterias.
- Sistemas anaerobios: en este caso el aceptor final de electrones es la propia materia orgánica que actúa como fuente de carbono. Como resultado de este metabolismo, la mayor parte del carbono se destina a la formación de subproductos del crecimiento (biogás, que es CO₂ y metano) mientras que la fracción de carbono utilizada para la síntesis celular es baja.
- Sistemas anóxicos: se denominan así los sistemas en los que el aceptor final de electrones no es el oxígeno ni la materia orgánica. En condiciones anóxicas el aceptor final de electrones suelen ser los nitratos, los sulfatos, el hidrógeno, etc.

¹³ ROLDÁN, Gabriel y RAMÍREZ, John. Fundamentos de limnología neotropical. [En línea]. Medellín: Universidad de Antioquia, 2008. Segunda edición. [Consultado el 16 de Octubre 2018]. Disponible en PDF: <http://www.ianas.com/docs/books/wbp14.pdf>. ISBN 9789587141443.

¹⁴ CONDORCHEM ENVITECH. [Sitio web]. Tratamiento biológico de aguas residuales. [Consultado el 16 de Octubre 2018]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>.

2.5 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

Los procesos de oxidación avanzada (POA) constituyen en el futuro una de las tecnologías más utilizadas en el tratamiento de las aguas contaminadas con productos orgánicos recalcitrantes¹⁵. Los métodos consisten en aumentar la eficiencia de algunos procesos de degradación natural, en la cual además de la irradiación se utilizan agentes generadores de radicales hidroxilo y catalizadores metálicos conocidos como tecnologías avanzadas de oxidación¹⁶, que aseguran oxidaciones casi completas de la materia orgánica.

2.5.1 Fotólisis. Los métodos fotolíticos para la degradación de contaminantes disueltos en el agua se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación, la cual es absorbida por las distintas moléculas para alcanzar estados excitados en el tiempo necesario para experimentar reacciones. El proceso tiene lugar en el dominio del UV-C (210– 230nm) y se basa en la formación de radicales C-centrados; es decir, radicales libres. La eficiencia del proceso depende principalmente de la capacidad de absorción de radiación y de la presencia de otros compuestos que absorben la misma longitud de onda¹⁷.

2.5.2 Fotocatálisis. Para que estos procesos se lleven a cabo es necesaria la presencia de agentes oxidantes, los cuales permiten la formación de dichos radicales. Por ejemplo, el peróxido de hidrógeno es un potente agente oxidante no selectivo y una excelente fuente de radicales libres; es además un aditivo deseable ecológicamente ya que durante su descomposición únicamente se genera agua y/o

¹⁵ GARCÉS GIRALDO, Luis, MEJÍA FRANCO, Edwin y SANTAMARÍA ARANGO, Jorge. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: *LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN*. [En línea]. Vol. 1, no. 1, p. 83-92. [Consultado 21 Octubre 2018]. Disponible en: <http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/083-92%20La%20fotocat%C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>.

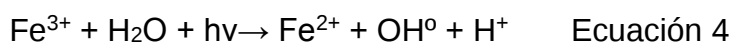
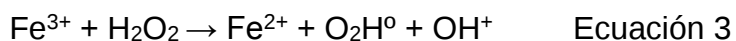
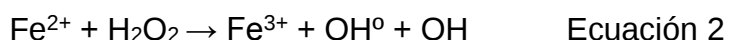
¹⁶ BURROWS, H., *et al.* Op. cit.

¹⁷ GARCÉS GIRALDO, MEJÍA FRANCO y SANTAMARÍA ARANGO. Op. cit.

oxígeno. El éxito del proceso radica en la formación estequiométrica de radicales hidroxilo ($\text{OH}^\bullet$) a partir de la descomposición fotocatalítica del H_2O_2 (Ecuación 1)¹⁸.



2.5.3 Fotocatálisis con reactivo fenton. La adición de sales de hierro como catalizador en presencia de peróxido de hidrógeno es conocido como reactivo Fenton, siendo uno de los métodos clásicos de producción de radicales hidroxilo en donde se inicia una cadena de reacciones para eliminar toda la materia oxidable, resultando así uno de los agentes oxidantes más potentes a pH ácidos (pH 3 – 5). Este reactivo presenta una mayor efectividad a pH ácido, debido a la aparición de hidróxidos de hierro a pH mayor de 3 como precipitados coloidales, lo cual hace necesario su separación mediante un proceso adicional de tipo coagulación, sedimentación o filtración.



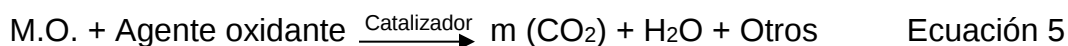
La reacción UV/visible acelera las reacciones fenton (Ecuación 4), favoreciéndose así la degradación de contaminantes orgánicos. Por ejemplo, en las reacciones de fenton tradicional el Fe^{2+} actúa como catalizador en la descomposición del H_2O_2 dando lugar a la formación de radicales $\text{OH}^\bullet$ (ecuación 2), en esta reacción los iones Fe^{3+} se van acumulando a medida que los Fe^{2+} se consumen y la reacción finalmente se detiene¹⁹.

¹⁸ Ibíd., p. 86.

¹⁹ Ibíd., p. 87.

2.6 MEDICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

2.6.1 Demanda química de oxígeno. La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro de calidad de aguas altamente usado como una medida alterna de la biodisponibilidad de carbono en un corto período de tiempo a diferencia de la demanda bioquímica de oxígeno que requiere de días. En otras palabras, se define como la cantidad de oxígeno (mgO_2/L) necesaria para la oxidación de toda la materia orgánica y compuestos oxidables contenidos en un volumen de muestra a dióxido de carbono y agua como se muestra en la ecuación 5²⁰. Esta prueba consiste en el calentamiento por reflujo de la muestra durante dos horas aproximadamente en presencia de una cantidad conocida de oxidante fuerte como el dicromato de potasio.



2.6.2 Carbono orgánico disuelto. El carbono orgánico total incluye sustancias disueltas y particuladas de la materia orgánica natural. Entre estos, el carbono orgánico disuelto tiene mayor interés dado que el particulado es fácilmente eliminado por coagulación y floculación. El carbono orgánico disuelto indica la concentración de carbono en las moléculas orgánicas presentes en una muestra de agua tras ser filtrada a través de poros de 0,45 micras. En los efluentes de agua tratada o recursos naturales de agua, el carbono orgánico disuelto es una medida de los componentes orgánicos que permanecen después de que los compuestos rápidamente biodegradables hayan sido consumidos. Esto no quiere decir que el COD en estas aguas sea inerte biológicamente ya que estos compuestos podrían ser degradados muy lentamente proporcionando aun carbono y energía para las bacterias²¹.

²⁰ SAWYER, Clair, MCCARTHY, Perry y PARKIN, Gene. Química para ingeniería ambiental. (4° Ed). MassaMc. Graw-Hill.

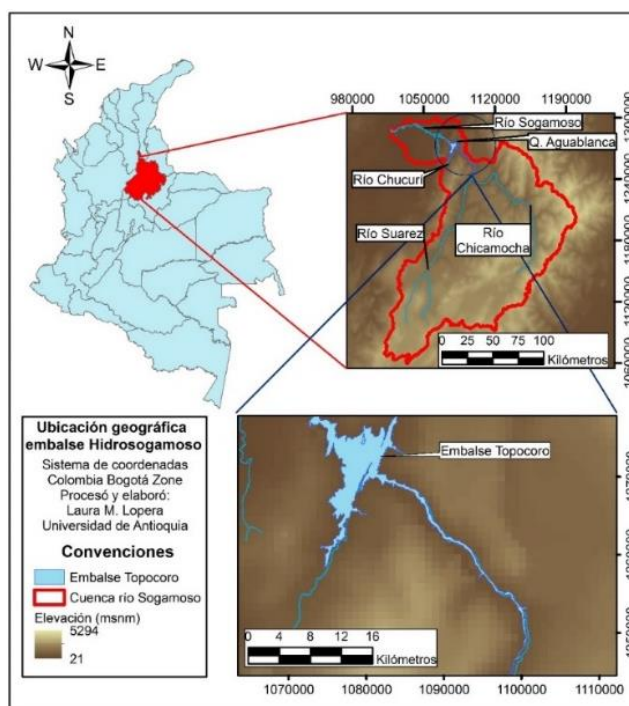
²¹ ORTIZ MINGO, Jesús. Tratamientos avanzados de agua potable para eliminación de materia orgánica disuelta: aplicación del BAC. Tesis doctoral en Ingeniería de caminos, canales y puertos. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingeniería, 2015, 12p.

3. METODOLOGÍA

3.1 ZONA DE ESTUDIO Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La central hidroeléctrica del embalse Topocoro se ubica en el departamento de Santander, Colombia, 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 Chicamocha (Figura 3). El área de influencia está conformada por los municipios de Girón, Betulia, Zapatoca, Los Santos, Lebrija, San Vicente de Chucurí, Barrancabermeja, Puerto Wilches y Sabana de Torres²².

Figura 3. Ubicación geográfica zona de estudio

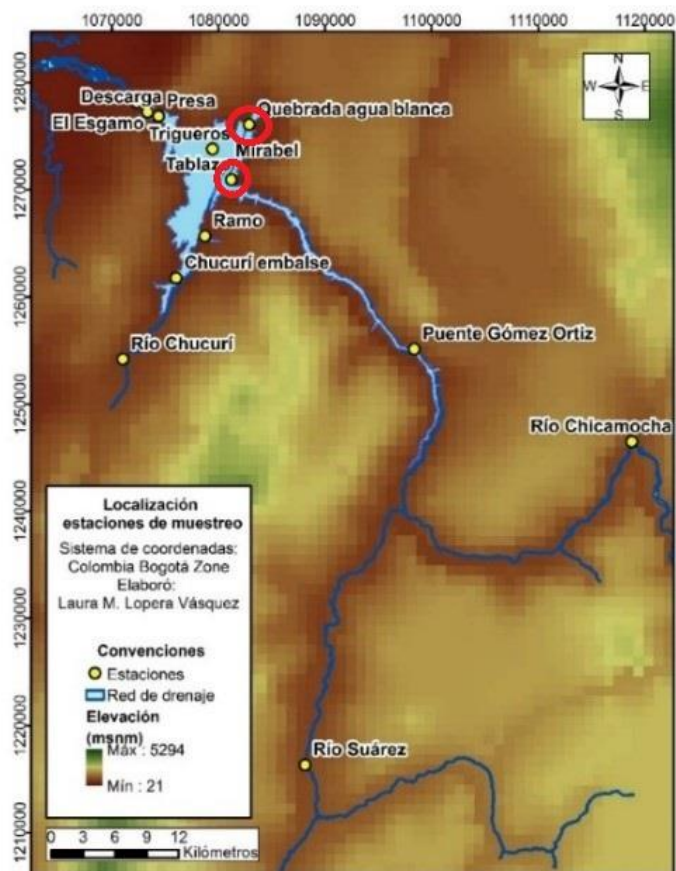


Fuente: GDCON. Variación espacio-temporal de las emisiones netas de gases de efecto invernadero desde el pre-llenado hasta el post-llenado del proyecto hidroeléctrico Sogamoso. Medellín, 2016.

²² ISAGEN. [Sitio web]. Central Hidroeléctrica Sogamoso. [Consultado el 20 de Noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.isagen.com.co/SitioWeb/es/nuestro-negocio/generamos-energia#central-hidroelectrica-sogamoso>.

En particular, este estudio se centró en dos puntos estratégicos del embalse: primero en el Tablazo por ser el punto de entrada del río Sogamoso que constituye uno de los principales afluentes del río Magdalena y la principal fuente de la hidroeléctrica, además de ser la confluencia entre el río Suarez y el río Chicamocha. Segundo en la quebrada Agua Blanca debido a que antes del llenado del embalse esta zona tenía como principal uso la actividad ganadera y además, es receptora de vertimientos de aguas residuales generados por los asentamientos de poblaciones cercanas, lo que conlleva a poseer alta carga de materia orgánica, siendo un punto poco estudiado anteriormente y que genera un alto grado de interés ambiental.

Figura 4. Localización estaciones de muestreo



Fuente: 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, 2016.

Las muestras de agua del embalse fueron tomadas en la zona fótica, es decir, en la columna de agua hasta donde penetra la luz del sol y son posibles los procesos fotosintéticos, por ser el lugar en donde se genera mayor transferencia de oxígeno el cual es usado por las bacterias para degradar la materia orgánica. En total se realizaron 3 muestreos haciendo la recolección de las muestras en recipientes de plástico, con capacidad de 10 litros para ser transportadas al laboratorio GDCON de la ciudad de Medellín y proceder al montaje de los reactores y demás experimentos.

3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

La degradación de la materia orgánica se realizó a través de dos procesos tanto biológico como químico, los cuales se llevaron a cabo en el laboratorio GDCON de la Universidad de Antioquia. En el cual primero se efectuó el montaje de ocho reactores aerobios para la degradación biológica y para la degradación química se realizó por medio de tres técnicas avanzadas de oxidación las cuales fueron: fotólisis, fotocátalisis y fotofeton, estas técnicas se realizaron con el fin de tener una línea base máxima de posible degradación de materia orgánica que se puede lograr con la degradación biológica.

3.2.1 Montaje de reactores aerobios. La primera parte consistió en analizar la degradación de la materia orgánica en procesos biológicos aerobios, para lo cual se realizó el montaje de ocho (8) reactores: cuatro (4) reactores para cada punto de muestreo seleccionado (Figura 5), adicionando a cada reactor cinco (5) litros de agua; marcando cada litro adicionado para tener un control de la cantidad de agua que es disminuida semana tras semana al realizar los análisis correspondientes, evitando con esto que el reactor se quedara sin agua antes del tiempo final de los ensayos. Como segundo paso a dos (2) de los reactores de cada punto se le adicionaron 3 gramos triturados de materia orgánica compuesta por una combinación de hojas, pasto y ramas de diferentes especies encontradas en el

embalse; estos 3 gramos adicionados a cada uno se tomaron como base de un estudio previo²³, y se realizó con el fin de determinar si existe una diferencia significativa o interferencia entre los parámetros analizados que hagan que se obtenga valores de degradación muy por debajo de los otros reactores con la adición de esta materia orgánica.

Figura 5. Montaje experimental en reactores aerobios



Para finalizar y garantizar que este proceso fuera totalmente aerobio se empleó en cada reactor un aireador compuesto de una bomba de aire y un difusor, luego se sellaron los reactores para garantizar, primero el flujo constante de aire y que este no interviniera con el aire atmosférico y segundo para evitar la pérdida de agua por evaporación.

3.2.2 Degradación en simulador solar. Para el proceso de degradación por fotólisis, fotocátalisis y foto-fenton se utilizó el simulador solar SUNTEST XLS+ ATLAS (Figura 6), el cual se programó para producir una irradiación de 500 W/m²

²³ PEÑUELA, Gustavo, *et al.* Op. cit.

durante 360 minutos o 6 horas a una temperatura constante de 35 °C. Esta irradiación se tomó como un aproximado de las irradiaciones diarias que puede presentar el planeta tierra, debido a que la intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar de 1353 W/m² gracias a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera²⁴.

Figura 6. Simulador solar SUNTEST XLS+ ATLAS



Las reacciones fueron llevadas a cabo en Erlenmeyers de 250 mL, manteniendo una agitación constante y tomando muestras para análisis de DQO en tiempos variables dependiendo de la velocidad de degradación que se observaba a lo largo de cada ensayo. Para los procesos de fotocatalisis y fotofenton se realizó el procedimiento empleando dos pH diferentes: uno ácido por debajo de 3, descrito como el ideal y con el cual se obtienen mejores resultados²⁵ y el otro un pH entre 6 y 8 que es el pH promedio que se ha monitoreado en el embalse. Esto se realizó con el fin de determinar si el cambio de pH tiene alguna influencia significativa en este proceso químico, ya que si se desea aplicar a escala real para el tratamiento

²⁴ UNAM. [En línea]. El potencial de la radiación solar. [Consultado el 12 de Diciembre 2018]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf>.

²⁵ KATSUMATA, H., et al. Humic acid degradation in aqueous solution by the photo Fenton process. En: *Chemical Engineering Journal*. 2008, vol. 137, p. 225-230.

de aguas es más viable desde el punto de vista económico utilizar el pH normal del embalse debido a que no es necesario adicionar grandes cantidades de ácido al agua, además de evitar gastos innecesarios en una infraestructura resistente a la corrosión. Los tiempos y toma de muestra de cada ensayo se distribuyeron de la siguiente manera:

Tabla 1. Distribución de las muestras de fotodegradación

Parámetro	Cantidad de muestras	Observaciones
Fotolisis (Solo agua)	1. Inicial 2. A las 6 horas 3. A las 12 horas	Se tomó un mayor tiempo entre muestras debido a que por experiencias anteriores este es un proceso más lento.
Fotocatálisis a pH ácido y pH del embalse. (Agua + Hierro)	1. Inicial 2. A las 2 horas 3. A las 4 horas 4. A las 6 horas	Se tomó una concentración estándar de Hierro de 10 mg por cada litro de agua.
Fenton a pH ácido y pH del embalse. (Agua + Hierro + peróxido de Hidrogeno)	1. Inicial 2. A la 1 hora 3. A las 2 horas 4. A las 3 horas	Se tomó una concentración estándar de Hierro de 10 mg por cada litro de agua y de peróxido de Hidrogeno 50 mg por cada litro de agua.

Para los reactivos requeridos se utilizó una sal de hierro la cual fue cloruro de hierro $FeCl_3$, la cantidad de sal a utilizar se calculó de la siguiente manera:

$$\frac{mg FeCl_3}{L} = \frac{mg Fe}{L} * \frac{PM sal}{PM Fe} = 10 \frac{mg Fe}{L} * \frac{162,2 mg FeCl_3}{55,845 mg Fe} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$= 29 \frac{mg FeCl_3}{L}$$

Los ensayos fueron llevados a cabo en un recipiente de 250 mL, por lo tanto, la cantidad de sal a utilizar sería:

$$mg FeCl_3 = 250 mL * \frac{29 mg}{1000 mL} = 7,25 mg FeCl_3 \quad \text{Ecuación 7}$$

Para el peróxido de Hidrogeno se tenía con una concentración al 30% peso a peso equivalente a 30 gramos de peróxido de hidrogeno en 100 mL de agua, por lo tanto, para una concentración final de 50 mg/L y un volumen de 250 mL de solución se necesitan:

$$Volumen\ de\ H_2O_2 = \frac{\frac{50\ mg}{1000\ mL} * 250\ mL}{\frac{30000\ mg}{100\ mL}} = 0,04166\ mL \quad \text{Ecuación 8}$$

$$= 41,667\ \mu L\ de\ H_2O_2\ al\ 30\%$$

3.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO

Con los reactores en funcionamiento se procedió hacer medidas de pH, potencial redox, oxígeno disuelto, conductividad, carbono orgánico disuelto (COD), sólidos totales, sólidos volátiles y demanda química de oxígeno (DQO) correspondientes al tiempo cero, es decir al agua que fue transportada directamente del embalse. Pasados 12 días y esperando la estabilización de todo el proceso se continuó midiendo los parámetros in situ y la DQO en todos los reactores, durante un periodo aproximado de 4 meses en intervalos aproximados de 1 semana. Adicionalmente, también se realizaron medidas de los gases metano y dióxido de carbono, solidos totales y solidos volátiles y COD en cada reactor durante el mismo periodo de tiempo, pero con una frecuencia de 15 días aproximadamente en cada análisis. Después de estos cuatro meses se realizaron monitoreos aleatorios a los reactores para llevar un control de posibles cambios en estos a lo largo del tiempo, hasta un tiempo final de siete meses aproximadamente.

Para 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 y el Potencial Redox. En el caso de la DQO este parámetro se realizó en base al método de análisis

5220D del Estándar Métodos (Método de reflujo cerrado/Método colorimétrico) que consiste en la digestión de la muestra con dicromato de potasio y posteriormente la lectura colorimétrica, con la diferencia que el proceso se realizó a través de un kit el test 027 de DQO 40 en el cual los reactivos ya se encuentran predosificados con precisión en tubos de 16 mm y su lectura se realiza en el nanocolor Macherey 500D. Por su parte la determinación de COD se basó en el método de análisis 5310B del Estándar Métodos (Método de combustión a alta temperatura) que consiste en someter la muestra a combustión y luego cuantificar el CO₂ generado. Para la COD primero se filtra la muestra a analizar a través de un filtro de membrana de Nylon de 0,45 µm en viales de 40 mL previamente muflados a una temperatura aproximada de 400 °C durante al menos una hora, luego cada uno de ellas son preservadas a pH<2 utilizando ácido fosfórico H₃PO₄, para ser llevadas a su posterior lectura en el analizador de carbono orgánico total Apollo 9000.

En los sólidos, el principio del método parte de la evaporación de una muestra bien mezclada, en una capsula pesada y secada a peso constante en una estufa Universal Memmert para operación a 103-105 °C. El aumento de peso con respecto al de la capsula vacía representan los sólidos totales. Para los sólidos volátiles lo que se hace es que con la misma capsula obtenida después del procedimiento de sólidos totales, se procede a realizar una incineración en una mufla Terrígeno D8 a 550 °C, el peso perdido por el calentamiento representa los sólidos volátiles.

Y finalmente para las muestras de gases se tomaron muestras directamente desde las válvulas superiores de cada reactor a través de una manguera, la cual fue conectada a una bomba de extracción de gases conectada por la otra terminal a una bolsa Tedlar de 0,25 litros de volumen. Una vez la bolsa se encontraba llena y sellada, se procedía a llevar las muestras para realizar la lectura en el cromatógrafo de gases Agilent 7890B por cromatografía gaseosa con detectores FID-Metanizador y µECD.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 REACTORES AEROBIOS

4.1.1 Caracterización inicial. Se realizó una caracterización del agua presente en los dos puntos de muestreo seleccionados con el fin de determinar si se tenían las condiciones mínimas necesarias para realizar la degradación de la materia orgánica, tomando como base un promedio de 16 datos históricos de los muestreos realizados entre los años 2015 a 2018 en el embalse de Topocoro del convenio 4620 con ISAGEN, mostrados en la tabla 2:

Tabla 2. Caracterización agua del embalse

Parámetro	Estación de muestreo	
	Tablazo	Agua Blanca
ST (mg/L)	142,0±19,1	242,6±180,9
SV (mg/L)	47,8±16,5	56,3±27,7
COD (mgC/L)	3,0±0,5	2,7±0,8
DQO (mgO ₂ /L)	10,0±2,3	10,0±4,0
Nitratos (mgNO ₃ ⁻ /L)	0,3±0,1	0,5±0,2
Fósforo (mgP/L)	0,1±0,1	0,3±0,4

Los resultados evidencian la presencia tanto de nutrientes: como el nitrógeno y el fósforo, como también materia orgánica, todos estos esenciales para el crecimiento microbiano y, por tanto, requeridos para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica vía aerobia. Se considera que el agua analizada en los puntos seleccionados en el embalse es apta para ser degradada por un proceso aerobio permitiendo el correcto crecimiento y desarrollo de los microorganismos.

4.1.2 Parámetros in situ en los reactores. Para poder evaluar las condiciones aerobias 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 3.

Tabla 3. Promedio parámetros In Situ

Punto	Parámetro			
	Oxígeno (mg/L)	Redox (mv)	pH	Conductividad (µs/cm)
Tablazo 1	6,750±0,26	135,606±22,76	8,011±0,16	232,269±24,22
Tablazo 2	6,822±0,33	144,900±19,06	8,007±0,09	227,519±21,83
Tablazo 3*	6,783±0,30	139,569±19,72	8,061±0,08	252,956±27,10
Tablazo 4*	6,740±0,36	146,356±25,63	8,122±0,08	243,644±17,50
Agua Blanca 1	6,823±0,33	98,538±41,46	8,119±0,17	241,469±11,12
Agua Blanca 2	6,776±0,29	127,538±41,15	8,095±0,14	251,706±24,94
Agua Blanca 3*	6,752±0,37	131,156±30,37	8,132±0,11	277,894±32,74
Agua Blanca 4*	6,676±0,34	147,250±39,55	8,056±0,16	292,581±41,39

*Corresponden a los ensayos de agua + material vegetal

Estos resultados demostraron que todos los reactores durante los 199 días de análisis conservaron la estabilidad en cada uno de los parámetros analizados, permitiendo la correcta degradación a partir de los microorganismos presentes, especialmente porque se mantuvo un nivel de oxígeno aproximadamente constante durante todo el proceso permitiendo a los microorganismos aerobios oxidar la materia orgánica y usarla como fuente de energía para su crecimiento.

Adicional a esto como cada organismo tiene su pH óptimo para crecer y un rango fuera del cual no tiene lugar ninguna proliferación celular, los resultados de pH se ajustan muy bien a los requerimientos de los microorganismos aerobios encontrándose cercano a la neutralidad y al rango óptimo de estos que se encuentra entre 6,5-7,5, además el potencial redox, al arrojar valores positivos favorece las condiciones oxidativas, y, por ende, el metabolismo aerobio de estas.

4.1.2 Degradación de la materia orgánica en los reactores. Los parámetros más importantes analizados para determinar la cantidad de materia orgánica en los reactores fueron la DQO y la COD, ya que permiten determinar el contenido total de materia orgánica en muestras acuosas a partir de la cantidad de oxígeno necesaria

para su completa oxidación en el caso de la DQO y concentración de carbono orgánico en el caso de la COD. Los experimentos se llevaron a cabo por un periodo de tiempo de aproximadamente 7 meses (199 días), logrando una cinética de degradación en los reactores presentados en la Figuras 7,8,9 y 10:

Figura 7. Degradación Tablazo con solo agua

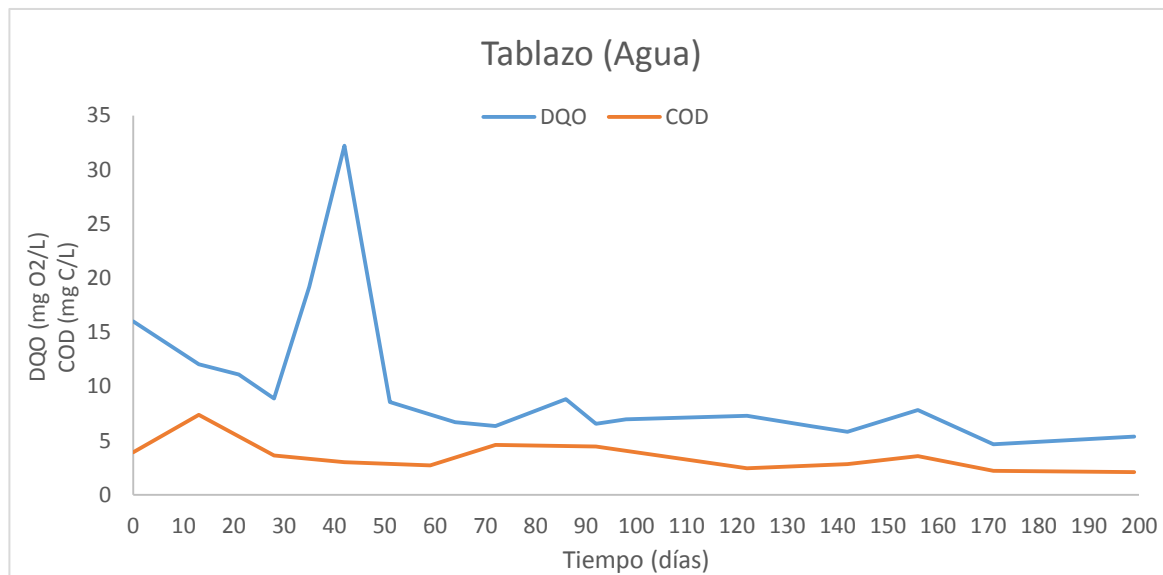


Figura 8. Degradación Tablazo con material vegetal

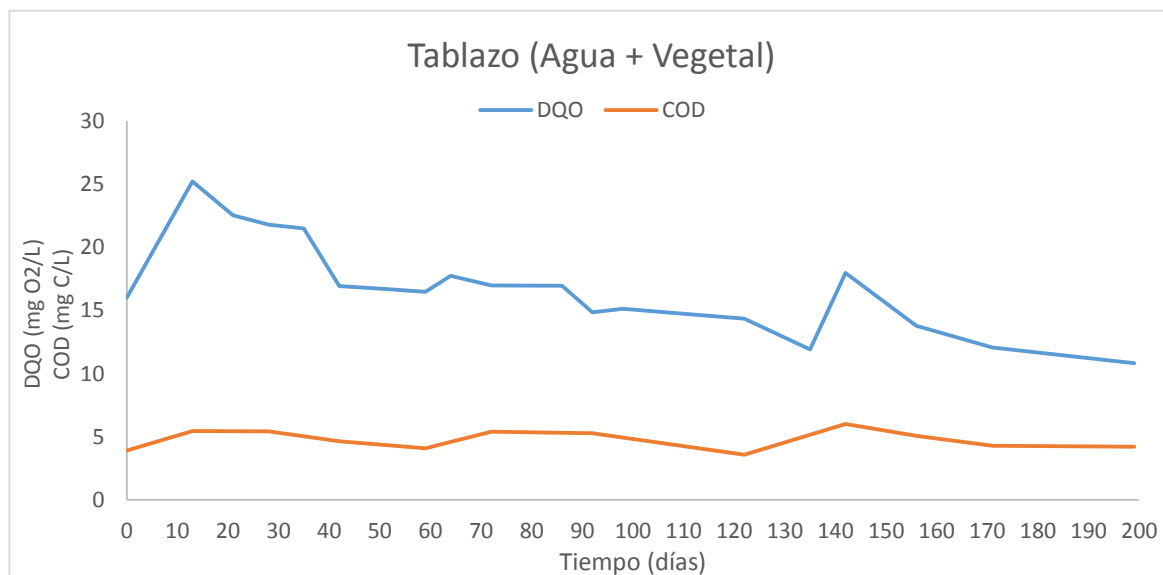


Figura 9. Degradación Agua Blanca con solo agua

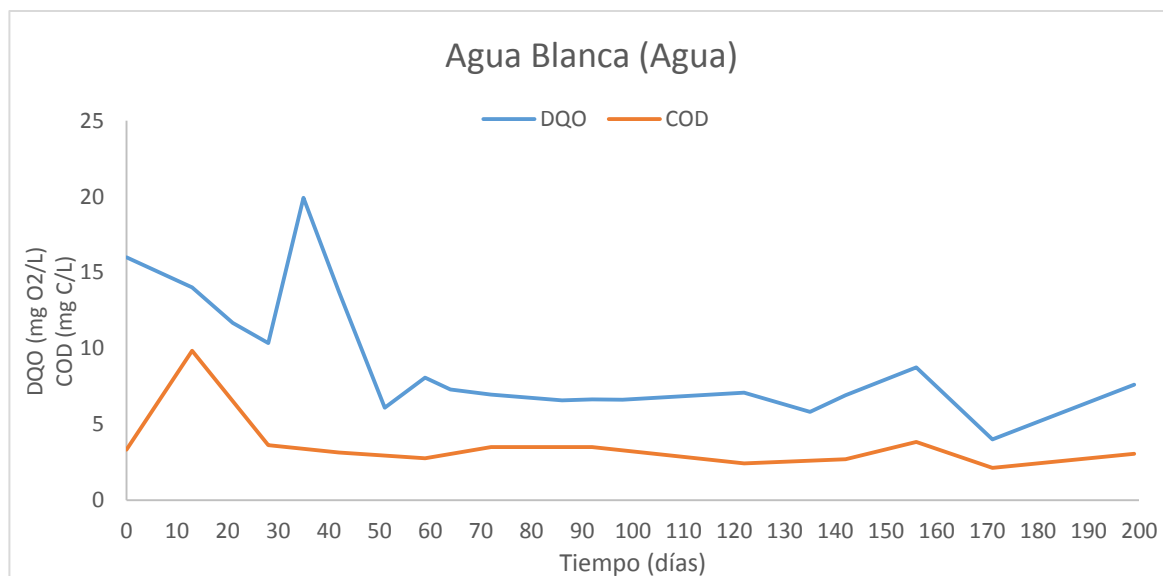
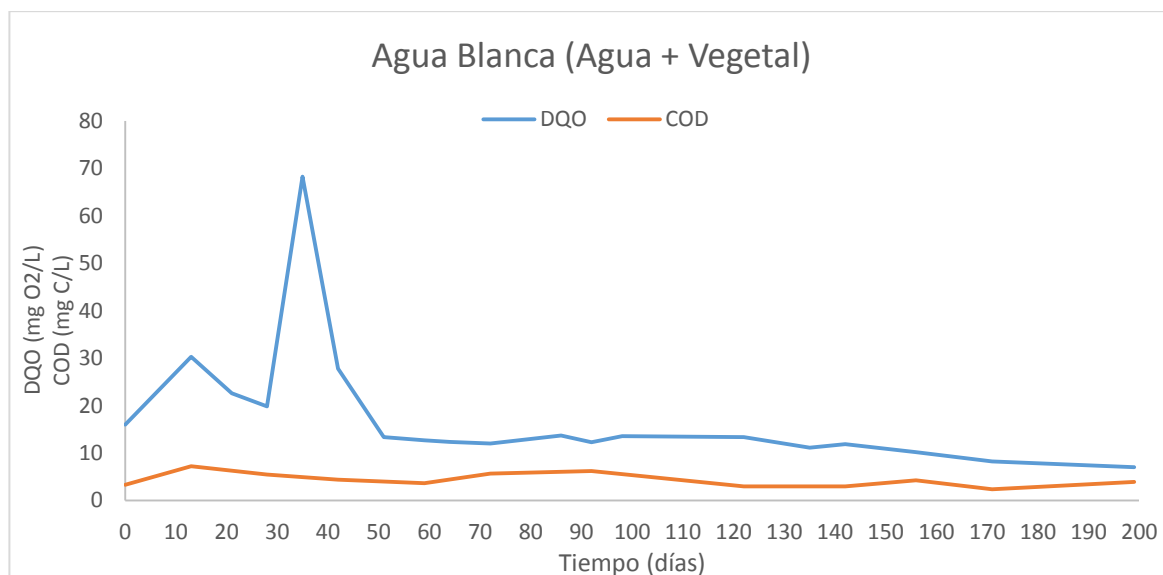


Figura 10. Degradación Agua Blanca con material vegetal



Encontrándose en cada reactor un pico inicial, indicando el rompimiento de las moléculas de la materia que se alcanza a disolver antes de que los microorganismos empiecen su proceso de degradación. Obteniéndose porcentajes de degradación máximos en cada reactor tanto para la DQO como el COD, presentados en la tabla

4 y calculados como la fracción entre la diferencia de DQO o COD en el tiempo cero y la encontrada en cada análisis sobre nuevamente la DQO o COD inicial.

Tabla 4. Porcentaje de degradación

Máximo porcentaje de degradación		
Punto	DQO	COD
Tablazo (Agua)	70,77%	46,65%
Tablazo (Agua + Vegetal)	32,41%	8,78%
Agua Blanca (Agua)	74,91%	36,21%
Agua Blanca (Agua + Vegetal)	56,22%	28,08%

Para los reactores que tenían material vegetal, el porcentaje de degradación fue más bajo ya que en este caso, los microorganismos requieren más tiempo para poder realizar la degradación, esto debido a la adición de materia orgánica. En el caso de los ensayos de degradación solo con agua (sin material vegetal), los porcentajes de degradación fueron mayores rondando el 70% de degradación debido a que no contenían materia orgánica adicional a la encontrada en el embalse, permitiendo a los microorganismos consumir ésta más rápido.

4.1.3 Correlación entre parámetros. Con el fin de determinar la relación que existe entre las variables más importantes analizadas en los reactores se realizó un análisis de datos de coeficiente de correlación en Excel obteniéndose los siguientes datos para cada reactor (Tabla 5):

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre parámetros

Coeficiente de correlación			
Punto	DQO Y COD	DQO Y CO2	COD Y CO2
Tablazo (Agua)	0,08634	0,06561	0,30967
Tablazo (Agua + Vegetal)	0,57312	0,60527	-0,10100
Agua Blanca (Agua)	0,67045	0,46887	0,58799
Agua Blanca (Agua + Vegetal)	0,56654	0,17064	-0,17793

El valor del índice de correlación lineal varía en el intervalo $[-1,1]$, permitiendo aproximar la relación de dependencia entre dos variables, una dependiente de la otra, indicando con el signo el sentido de la relación de la siguiente manera²⁶ (Tabla 6):

Tabla 6. Grado de correlación entre variables

Valor del coeficiente de Pearson	Grado de correlación entre las variables
$r = 0$	No existe relación lineal.
$r = 1$	Existe una correlación positiva perfecta. Cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
$0 < r < 1$	Existe una correlación positiva.
$r = 0$	No existe relación lineal.
$-1 < r < 0$	Existe una correlación negativa
$r = -1$	Existe una correlación negativa perfecta. Cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante

Fuente: SOKA. [En línea]. Diagramas de dispersión y modelo de regresión lineal en R. [Consultado el 12 de Abril 2019]. Disponible en: <https://soka.gitlab.io/blog/post/2019-02-05-diagramas-dispersion-en-r/>.

Según la tabla 6, se evidencia una relación lineal positiva más fuerte entre la DQO Y COD en el punto de muestreo Agua Blanca debido principalmente a que este punto anteriormente fue una zona ganadera y de depósito de vertimientos de aguas residuales, siendo mayor la carga orgánica en este punto, con respecto a otros puntos del embalse, a diferencia de tablazo en el que esta correlación lineal es más baja debido a la presencia de material inorgánico a lo largo del cauce ya que este presenta zonas muy áridas y explotación de canteras, que pueden generar arrastre de compuestos inorgánicos.

²⁶ SOKA. [En línea]. Diagramas de dispersión y modelo de regresión lineal en R. [Consultado el 12 de Abril 2019]. Disponible en: <https://soka.gitlab.io/blog/post/2019-02-05-diagramas-dispersion-en-r/>.

Respecto a la relación de la DQO y COD con el CO₂ no se encontró una relación directa entre estos, pues se presentaron muchas variaciones en los resultados debido a que este proceso no es totalmente eficiente logrando mineralizaciones de la materia orgánica incompletas, ya que todos los microorganismos no son capaces de degradar totalmente la materia orgánica dejándola en un paso intermedio, sirviéndoles como alimento para su crecimiento y reproducción.

4.2 PROCESOS DE OXIDACION AVANZADA

Los procesos de oxidación avanzada se realizaron en un periodo de tiempo más corto de 21 horas; las cuales se distribuyeron según la rapidez evidenciada en cada proceso al momento de realizar el análisis, además de tener presente los reactivos adicionados en cada uno que hacen la reacción cada vez más rápida llevándose entonces la fotólisis en un tiempo de 12 horas, la fotocatalisis con cloruro de hierro como agente oxidante débil se llevó a cabo en 6 horas y el fotofenton que contenía un agente oxidante más fuerte se realizó en tan solo 3 horas. Los resultados de estos experimentos se exponen en la Tabla 7:

Tabla 7. Análisis POA

Proceso	Tiempo (Horas)	DQO (mg O ₂ /L)			
		Tablazo	Tablazo pH < 3	Agua Blanca	Agua Blanca pH < 3
Fotólisis	0	12	NA	13	NA
	6	11	NA	10	NA
	12	10	NA	9	NA
Reactivo Hierro	0	9	NA	10	NA
	2	4	4	4	2
	4	4	< 2	4	< 2
	6	< 2	< 2	< 2	< 2
FotoFenton	0	16	NA	12	NA
	1	5	< 2	< 2	< 2
	2	< 2	< 2	< 2	< 2
	3	< 2	< 2	< 2	< 2

NA= No Aplica

En la tabla anterior se muestra la degradación de la materia orgánica medida como DQO de cada una de las muestras, logrando degradaciones mayores comparadas con la degradación biológica en un tiempo más corto; con porcentajes de degradación aproximados del 88% al 100%, teniendo en cuenta que el límite de cuantificación de la DQO en este caso es de 2 mg O₂/L por lo que valores por debajo de este no son posibles de determinar con certeza. Adicional a esto se logra ver una pequeña diferencia entre las degradaciones que se realizaron en medio ácido ya que estas fueron más rápidas comprobando lo dicho por otros autores que a pH mayores se reduce la formación de radicales hidroxilo OH y con ello el rendimiento global del proceso.

5. CONCLUSIONES

Durante la primera parte del trabajo experimental, se obtuvo una curva de degradación de la materia orgánica presente en los reactores por vía aerobia. Según estas gráficas la biodegradación no sigue un comportamiento específico al no reflejar una disminución constante en los parámetros analizados si no por el contrario es bastante irregular en cada uno de los reactores reflejados en los picos que se obtienen a lo largo del tiempo de análisis debido a las condiciones presentes en estos y a los microorganismos que se encuentran allí, ya que no todos degradan la materia orgánica a la misma velocidad o simplemente no la degradan al no ser capaces de asimilar los mismos compuestos, consiguiendo con esto un proceso más lento y mineralizaciones de la materia orgánica incompletas transformándolas en otros productos intermedios para su crecimiento y reproducción. Sin embargo el porcentaje de degradación obtenido por este proceso que está en un rango de 50 al 70 % aproximadamente, resulta bastante bueno a pesar de no contar con condiciones controladas, por lo que se puede afirmar que aun sin disponer de todos los medios y controles necesarios si se puede lograr la degradación de la materia orgánica del embalse por este método ya que los nutrientes y microorganismos que este presenta son suficientes para obtener resultados positivos.

También en esta parte del proceso se realizó un análisis de correlación entre los tres parámetros más fundamentales en la degradación de la materia orgánica los cuales fueron la DQO, COD y CO_2 de los cuales solo la correlación entre DQO Y COD arrojaron resultados, esto se debe a que estos parámetros dependen de la cantidad de materia orgánica e inorgánica encontrada en el embalse y de las características específicas presentes en cada punto, por lo tanto si se desea aplicar esta técnica a otros embalses es importante considerar esto ya que los porcentajes de degradación pueden variar dependiendo del lugar analizado.

Para la segunda parte de este experimento, se emplearon técnicas de oxidación avanzadas, permitiendo con estas una degradación mucho más rápida y eficaz logrando porcentajes de degradación aproximadas en un rango de 88 al 100% utilizando agentes oxidantes fuertes, permitiendo con esto verificar la eficiencia de estos métodos de oxidación avanzada que logran generalmente una mineralización (destrucción) del contaminante, a diferencia de las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes y no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.

Tanto la primera técnica como la segunda presentan sus ventajas y desventajas, pero ambas permiten la degradación de la materia orgánica, ya depende de la necesidad y de los recursos de cada organismo encargado mirar que procedimiento le conviene más de acuerdo a sus requerimientos y tiempo disponible para emplear en el tratamiento. Sea cual sea la decisión lo importante es implementar una técnica que ayude a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero que estos cuerpos de agua generan y que son un problema que aqueja hoy en día a la sociedad y el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

BENAVIDES BALLESTEROS, Henry Oswaldo y LEÓN ARISTIZABAL, Gloria Esperanza. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. [En línea]. IDEAM. Diciembre, 2007. [Consultado el 12 de Octubre 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.

BURROWS, H., *et al.* Reaction pathways and mechanisms of photodegradation of pesticides. En: *Journal of photochemistry and photobiology B: Biology*. 2002, vol. 67, no. 2, p. 71-108.

CONDORCHEM ENVITECH. [Sitio web]. Tratamiento biológico de aguas residuales. [Consultado el 16 de Octubre 2018]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>.

EGGLESTON, Simon, *et al.* 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [En línea].Japón: Instituto de Estrategias Ambientales Globales (IGES), 2006 .Vol. 4. [Consultado el 15 de Octubre 2018]. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>. ISBN 4-88788-032-4.

FEARNSIDE, Philip M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam. En: *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change*. 2005, vol.10, no.4, p. 675-691.

GALY-LACAUX, Corinne, DELMAS, Robert y JAMBERT, Corinne. Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. En: *Global Biogeochemical Cycles*. [En línea]. 1997, vol. 11, no. 4, p. 471–483. [Consultado 21 Octubre 2018]. DOI: 10.1029/97gb01625.

GARCÉS GIRALDO, Luis, MEJÍA FRANCO, Edwin y SANTAMARÍA ARANGO, Jorge. La fotocátalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: *LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN*. [En línea]. Vol. 1, no. 1, p. 83-92. [Consultado 21 Octubre 2018]. Disponible en: <http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/083-92%20La%20fotocat%C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>.

GRUPO DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN. Variación espacio-temporal de las emisiones netas de gases de efecto invernadero desde el pre-llenado hasta el post-llenado del proyecto hidroeléctrico Sogamoso. Informe durante el post-llenado del embalse. Medellín: GDCON; 2016.

ISAGEN. [Sitio web]. Central Hidroeléctrica Sogamoso. [Consultado el 20 de Noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.isagen.com.co/SitioWeb/es/nuestro-negocio/generamos-energia#central-hidroelectrica-sogamoso>.

KATSUMATA, H., *et al.* Humic acid degradation in aqueous solution by the photo Fenton process. En: *Chemical Engineering Journal*. 2008, vol. 137, p. 225-230.

MEREU, S., *et al.* Operational resilience of reservoirs to climate change, agricultural demand, and tourism: A case of study from Sardinia. En: *Science of the total environment*. Junio 2015, vol. 543, p. 1028-1038. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.066.

ORTIZ MINGO, Jesús. Tratamientos avanzados de agua potable para eliminación de materia orgánica disuelta: aplicación del BAC. Tesis doctoral en Ingeniería de caminos, canales y puertos. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingeniería, 2015, 12p.

PAUCAR SAMANIEGO, Mayra Alejandra. Estudio de emisiones de metano producidas por embalses en centrales hidroeléctricas en Ecuador. Tesis de Magíster en Ingeniería de la Energía. Santiago: Pontificia Universidad católica de Chile. Escuela de Ingeniería, 2014, 13p.

PIRKLE, R.S., JACK, J.D. y BUKAVECKAS, P.A. Reduction in Trihalomethane Formation Potential through Air Oxidant. En: *Environmental Informatics Archives*. 2006, vol. 4, p. 273-279.

RAMOS, Carlos D. y NARVÁEZ, Jhon F. Control químico y biológico de materia orgánica en embalses. *Tratamiento Avanzado de aguas*. Medellín: GAIA; 2010.

RAMOS, Carlos D. y NARVÁEZ, Jhon F. Op. cit.

ROLDÁN, Gabriel y RAMÍREZ, John. Fundamentos de limnología neotropical. [En línea]. Medellín: Universidad de Antioquia, 2008. Segunda edición. [Consultado el 16 de Octubre 2018]. Disponible en PDF: <http://www.ianas.com/docs/books/wbp14.pdf>. ISBN 9789587141443.

SAWYER, Clair, MCCARTHY, Perry y PARKIN, Gene. Química para ingeniería ambiental. (4° Ed). MassaMc. Graw-Hill.

STACKELBERG, P., *et al.* Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water-treatment plant. En: *Science of The Total Environment*. 2004, vol. 329, no. 1-3, p. 99-113.

UNAM. [En línea]. El potencial de la radiación solar. [Consultado el 12 de Diciembre 2018]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf>.

SOKA. [En línea]. Diagramas de dispersión y modelo de regresión lineal en R. [Consultado el 12 de Abril 2019]. Disponible en: <https://soka.gitlab.io/blog/post/2019-02-05-diagramas-dispersion-en-r/>