



**CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE REACTOR SBR A ESCALA PARA
TRATAMIENTO DE VINAZA PROVENIENTE DE UN INGENIO
AZUCARERO (VALLE DEL CAUCA)**

Laura Paola Badillo Guevara

Daniel Plata Plata

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá D.C., Mayo de 2019

**Construcción y operación de reactor SBR a escala para tratamiento de vinaza
proveniente de un ingenio azucarero (Valle del Cauca)**

Laura Paola Badillo Guevara

Daniel Plata Plata

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero/a Ambiental

Directora:

Carel Elizabeth Carvajal Arias

Líneas de Investigación:

Salud Ambiental – Ingeniería para la salud y el desarrollo biológico

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2019



UNIVERSIDAD
EL BOSQUE

Vigilada Mineducación

SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1044

El día **15 MAYO 2019**, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE REACTOR SBR A ESCALA PARA TRATAMIENTO DE VINAZA PROVENIENTE DE UN INGENIO AZUCARERO (VALLE DEL CAUCA)**, escrito por **DANIEL PLATA PLATA, CÉDULA 1020817399** y **LAURA PAOLA BADILLO GUEVARA, CÉDULA 1032490339**, bajo la dirección de **CAREL ELIZABETH CARVAJAL ARIAS, CÉDULA 1032411403**, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **JAIME ALBERTO ROMERO INFANTE CÉDULA 19.493.138** y **WILMAR ALIRIO BOTELLO SUAREZ CÉDULA 8803185**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad.

Por lo tanto, el trabajo es: **Aprobado**.

En constancia, se firma en Bogotá, D.C. **15 MAYO 2019**




KENNETH OCHOA VARGAS
Director
Programa de Ingeniería Ambiental




GERMÁN AGUDELO ASCENCIO
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería

La Universidad El Bosque no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo. Sólo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo, en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

A mis padres, mis familias y a Dios.

“No sólo no hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy.” –Cerati.

Laura

Gracias a mis padres, familiares y allegados por estar siempre presentes y la vida por nunca dejarme rendir.

Daniel

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad El Bosque, los docentes involucrados y las auxiliares de laboratorio, por acompañamiento y disposición durante este proceso.

A nuestros amigos y familiares por haber acompañado esta etapa de nuestras vidas.

A Danna Fernández Calderón, por su apoyo y su amistad incondicional.

Tabla de contenido

Resumen.....	6
Abstract.....	6
Introducción.....	7
Planteamiento del problema.....	8
Pregunta de investigación.....	9
Justificación.....	9
Relación con las ciencias ambientales y en el área investigada.....	9
Objetivos.....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos.....	10
Marco de referencia.....	11
Estado del arte.....	11
Marco teórico-conceptual.....	14
Tratamiento biológico.....	14
Reactor aerobio.....	14
Proceso de lodos activado.....	14
Vinaza.....	14
Reactor SBR.....	15
Parámetros de medición.....	15
Marco legal.....	17
Marco geográfico.....	19
Marco institucional.....	20
Metodología.....	20
Metodología de la investigación.....	20
Área y línea de investigación.....	20
Enfoque de investigación.....	21
Alcance de la investigación.....	21
Método de la investigación.....	21
Técnica.....	21
Instrumentos.....	21

Metodología del proyecto	21
Objetivo específico 1: Establecer el diseño del biorreactor a partir de revisión bibliográfica.....	22
Objetivo específico 2: Evaluar el funcionamiento del reactor basado en la tecnología SBR de lodos activados a escala laboratorio que trata la vinaza.	23
Objetivo específico 3: Determinar el porcentaje de remoción de los parámetros medidos en la vinaza para validar la aplicabilidad del sistema.	24
Plan de trabajo.....	28
Resultados, discusión y análisis	29
Objetivo específico 1: Establecer el diseño del biorreactor a partir de revisión bibliográfica.....	29
Objetivo específico 2: Evaluar el funcionamiento del reactor basado en la tecnología SBR de lodos activados a escala laboratorio que trata la vinaza.	31
Objetivo específico 3: Determinar el porcentaje de remoción de los parámetros medidos en la vinaza para validar la aplicabilidad del sistema.	33
Conclusiones	47
Recomendaciones.....	48
Bibliografía	49
Anexos	54
Glosario	56

Listado de tablas

Tabla 1. Instrumentos legales relacionados con el vertimiento, tratamiento y disposición de aguas residuales industriales	17
Tabla 2. Volúmenes de vinaza y agua sintética para cada biorreactor	23
Tabla 3. Concentraciones utilizadas para la preparación de agua sintética	24
Tabla 4. Técnicas e instrumentos	25
Tabla 5. Parámetros aplicables contemplados en la Resolución 0631 de 2015	27
Tabla 6. Plan de trabajo para el desarrollo del proyecto	28
Tabla 7. Presupuesto general del proyecto	30
Tabla 8. Resultados de pH, CE, SDT medidos con multiparámetro	33
Tabla 9. Determinación de sólidos totales secados y sólidos suspendidos totales	37
Tabla 10. Determinación de nitritos y nitratos	40
Tabla 11. Determinación de turbiedad	42
Tabla 12. Determinación de color	42
Tabla 13. Determinación de oxígeno disuelto	44
Tabla 14. Determinación de DQO	45

Listado de figuras

Figura 1. Árbol de problemas de la contaminación del recurso hídrico y suelos por la vinaza.....	8
Figura 2. Relación del proyecto con las ciencias ambientales.....	10
Figura 3. Flujograma de metodología.....	22
Figura 4. Planos del biorreactor.....	29
Figura 5. Biorreactor en acrílico.....	30
Figura 6. Vinaza almacenada en las instalaciones del Ingenio.....	31
Figura 7. Rotulado volumétrico del biorreactores y pruebas hidráulicas.....	31
Figura 8. Llenado de biorreactor para tratamiento de vinaza.....	31
Figura 9. Medición del volumen de microorganismos del sistema ECOPAC®.....	32
Figura 10. Volumen óptimo de trabajo para el biorreactor de la vinaza.....	32
Figura 11. Adición de microorganismos al agua sintética.....	32
Figura 12. Montaje y puesta en marcha de ambos sistemas.....	32
Figura 13. Gráficas de pH.....	33
Figura 14. Escala de pH.....	34
Figura 15. Gráficas de conductividad eléctrica.....	35
Figura 16. Lodos sedimentados en el agua sintética.....	35
Figura 17. Gráficas de sólidos disueltos totales.....	36
Figura 18. Lodos activados al final del tratamiento.....	36
Figura 19. Vista en planta de los reactores antes de iniciar la operación.....	38
Figura 20. Vista en planta de los reactores el último día del tratamiento.....	38
Figura 21. Gráficas de STS y SST para agua sintética.....	39
Figura 22. Gráfica de STS y SST para vinaza.....	39
Figura 23. Kits de nitritos de Merk con tarjeta colorimétrica.....	40
Figura 24. Kit nitratos de Merk con tarjeta colorimétrica.....	40
Figura 25. Gráficas de nitritos.....	41
Figura 26. Gráficas de medición de nitratos.....	41
Figura 27. Gráfica de turbiedad (NTU) para agua sintética.....	43
Figura 28. Gráfica de color (PCU) para agua sintética.....	43
Figura 29. Gráfica de turbiedad para vinaza.....	43
Figura 30. Gráficas de color para vinaza.....	43
Figura 31. Gráficas de oxígeno disuelto para agua sintética y vinaza.....	45
Figura 32. Medición DQO agua sintética.....	46
Figura 33. Medición DQO vinaza.....	46

Resumen

Debido a la escasa información integral referente a los tratamientos de vinaza se optó por implementar una técnica de bajo costo y complejidad adecuada para tratamiento de aguas residuales, a la que se evaluó su eficiencia para el residuo estudiado. Por ello, se construyó y puso en funcionamiento simultáneo dos biorreactores basados en la tecnología SBR de lodos activados a escala laboratorio con un cultivo de microorganismos del reactor ECOPAC®200. El primero para tratamiento de vinaza y el segundo, que trabajó bajo las mismas condiciones con agua sintética, como control para sustentar el correcto funcionamiento de la técnica. La vinaza fue suministrada por un ingenio azucarero (Valle del Cauca-Colombia), mientras que el montaje experimental se realizó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad El Bosque (Bogotá-Colombia). Durante el proceso, se monitorearon diferentes parámetros como conductividad eléctrica (CE), sólidos (SDT, STS, SST), nitritos y nitratos, turbiedad, color, DQO, oxígeno disuelto (OD), y pH; con el fin de responder: por qué son los reactores de tipo SBR una alternativa viable para el tratamiento de la vinaza y mejorar sus parámetros físicos y químicos. Dentro de los resultados se obtuvo una disminución de: CE 23,88 %; SDT 22,07 %; STS 76,48 %; SST 72,42 %; nitritos 100 %; nitratos 100 %; turbiedad 18,88 %; color 18,77 % y DQO 11,62 %. Además, se obtuvo un incremento en el OD de 25,81 % mientras el pH se mantuvo en 3,8 durante el período experimental. A pesar de esto, los valores no fueron representativos en la vinaza lo que demostró que un reactor basado en la tecnología SBR no es la más adecuada para el tratamiento de este residuo, pues su elevado contenido de materia orgánica hace que no sea aplicable. Sin embargo, con el desarrollo de esta investigación se consigue ampliar la información aplicada al contexto colombiano en cuanto a la salud ambiental y compromiso industrial con el ambiente; resolviendo problemas relacionados con la vinaza mediante técnicas que puedan ser aplicables a mayor escala.

Palabras clave: Vinaza, tratamiento biológico, reactor SBR, residuo industrial, aireación, parámetros físicos y químicos.

Abstract

Due to limited information concerning to vinasse treatment, a low cost and low complexity technique, developed for sewage treatment, was implemented and assessed for efficient treatment of the studied waste. Thus, two laboratory scale SBR reactors, using activated sludge with ECOPAC®200 microorganisms' growths, were built and put in operation. One for vinasse treatment, while the other, operating in same conditions with synthetic water, as scientific control for sustain the correct operation of the technique. Vinasse was supplied by a sugar mill located in Valle del Cauca, Colombia, meanwhile the experiment was set in the Environmental Engineering lab of the El Bosque university at Bogotá, Colombia. During the process, the following parameters were monitored: electric conductivity (EC), solids (TDS, TS, TSS), nitrites, nitrates, turbidity, color, COD, dissolved oxygen (DO), and pH; aiming to answer: why are SBR reactors a worthwhile alternative for vinasse treatment, and for improve its physical and chemical parameters? As results, was obtained a reduction of: EC 23,88 %; TDS 22,07 %; TS 76,48 %; TSS 72,42 %; nitrites 100 %; nitrates 100 %; turbidity 18,88 %; color 18,77 % y COD 11,62 %. Further, was obtained an increase in DO of 25,81 %, whereas pH maintains equal in 3,8 during the experimental period. Whereas, data were not representative in the vinasse indicating SBR technology not suitable enough for this waste treatment, since high quantity of organic material produce it is inapplicability. Nevertheless, this investigation achieves to broad the information applied to Colombian context in matters of environmental health and commitment from industries to it; resolving vinasse-related problems through easily attainable techniques on a larger scale.

Key words: Vinasse, biologic treatment, SBR reactor, industrial waste, aeration, physic and chemical parameters.

Introducción

Las investigaciones en Colombia sobre el tratamiento de residuos industriales (RI) son muy reducidas, debido a la complejidad y diversidad de estos. Uno de los problemas es que su generación está en constante aumento y los tratamientos que emplean no son suficientes para lograr disminuir diferentes cargas contaminantes presentes en estos, deteriorando los ecosistemas y recursos naturales como agua y suelo (Corredor & Pérez, 2018).

En la agroindustria de la caña de azúcar, a nivel mundial y en Colombia, se genera un subproducto de importancia: la vinaza. Según Aristizábal (2015), es un residuo líquido generado por las industrias azucareras durante la producción de alcohol mediante la caña de azúcar. En promedio se generan de 10 a 15 litros de vinaza por cada litro de alcohol producido, dependiendo de los equipos disponibles en la destilería. Este subproducto tiene un alto potencial contaminante, 100 veces mayor que el de las aguas residuales domésticas, debido a sus bajos niveles de pH (3-5), altas concentraciones de potasio y sulfatos, una alta DBO que oscila entre 10 y 65 g/L (Aristizábal, 2015), y cuya DQO varía entre 60000-130000 mg/L (Delgado, Rennola, & Lugo, 2006).

Aunque no se han reportado efectos negativos directos sobre la salud, estos desechos cuando no son tratados y son vertidos, aumentan la turbidez del agua, la actividad fotosintética, y disminuyen el oxígeno disuelto, además producen eutrofización interviniendo en el desarrollo natural de las especies acuáticas, deteriorando los ecosistemas aledaños y contribuyen al aumento de poblaciones de insectos y vectores que pueden desencadenar enfermedades; finalmente, evitan que pueda ser empleada en otros procesos o actividades humanas (Silva, 2016).

De esta manera, en diversos estudio, se buscan establecer tratamientos adecuados y eficientes que permitan disminuir la carga contaminante de la vinaza. Integran procesos químicos, biológicos y/o físicos, según la necesidad del producto final; tales como la digestión anaerobia en reactores UASB, tratamiento electroquímico, fotocátalisis solar, metanización y compostaje, degradación microbiológica, entre otros. Sin embargo, la efectividad de estos tratamientos depende de la naturaleza del residuo y las condiciones bajo las cuales se produjo. Por esta razón aún no existe un procedimiento estandarizado que funcione con los tipos de vinaza.

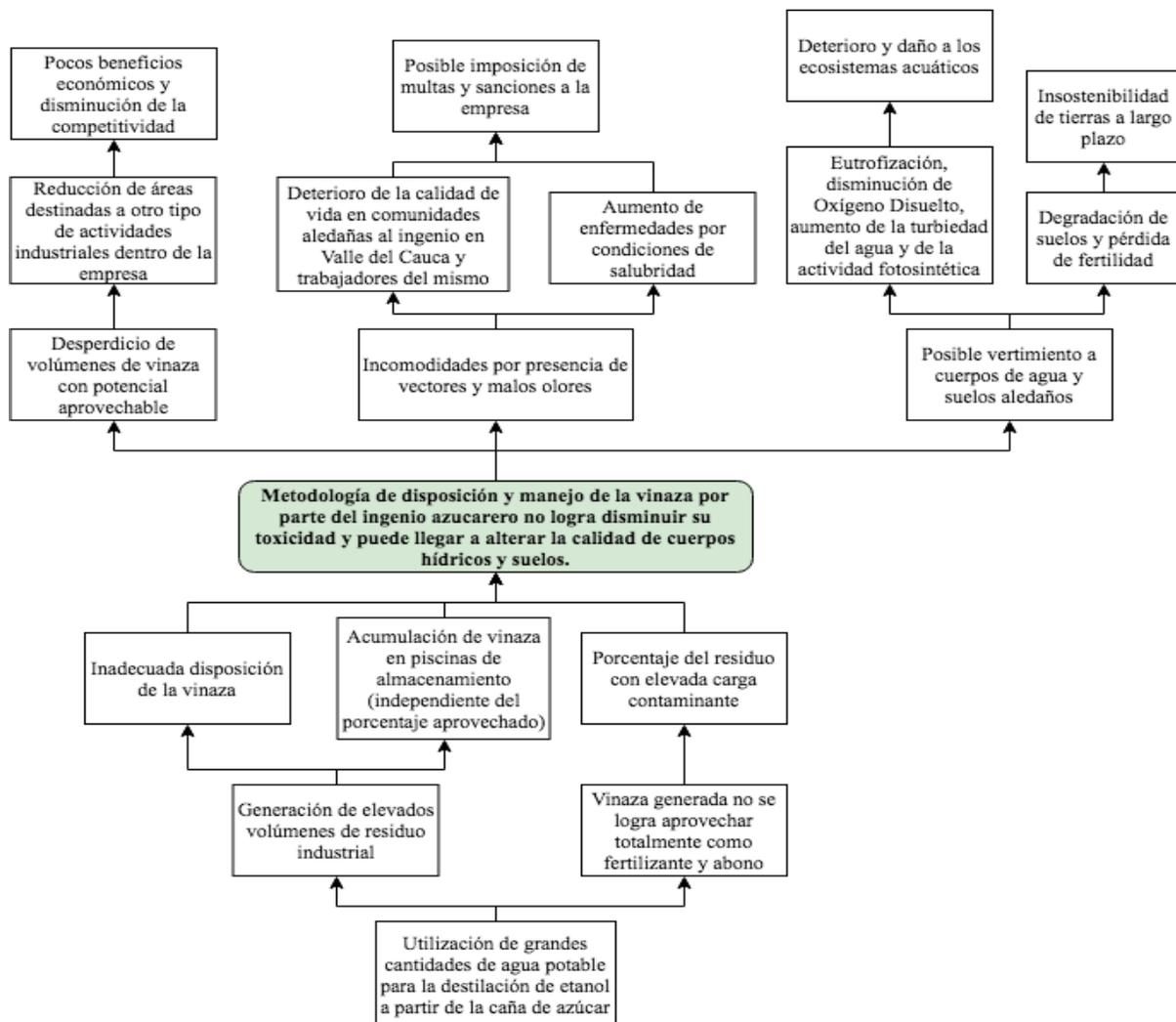
Mediante este proyecto se integró una técnica de tratamiento de aguas residuales para determinar su eficiencia con la matriz problema, construyendo y poniendo en funcionamiento un reactor SBR de lodos activados a escala laboratorio para el tratamiento de vinaza, proveniente de un ingenio azucarero (Valle del Cauca-Colombia). Durante el proceso, se monitorearon diferentes parámetros físicos y químicos; con el fin de resolver ¿qué tan eficiente es el tratamiento de la vinaza mediante este método? Otro propósito de esta investigación es ampliar la información aplicada a la agroindustria y los residuos derivados de la caña de azúcar.

Finalmente, el Ingenio como caso de estudio para el desarrollo de la investigación, solicitó que la información de su institución se manejara de manera prudente y que su identidad se mantuviera en anónimo, por cuestiones de confidencialidad. Por tal motivo, cumpliendo con la solicitud de la empresa, algunas especificaciones se encuentran descritas a manera general, como las que se desarrollan en el marco geográfico e institucional.

Planteamiento del problema

La vinaza es un desecho industrial que se genera al producir alcohol utilizando la melaza de la caña de azúcar (Lezcano & Mora, 2011). Este se encuentra entre los residuos orgánicos y químicos de mayor efecto contaminante sobre recursos hídricos naturales como: ríos, lagos, presas, canales y suelos. Actualmente, el ingenio azucarero del estudio realiza un pretratamiento para aprovechar el residuo convirtiéndolo en abono y fertilizante. Sin embargo, esto no es suficiente para lograr una disminución significativa de la carga orgánica influyente en la calidad de residuo, pues en caso de que un porcentaje de vinaza sea vertido sin ningún tratamiento previo, podría llegar a generar un fuerte impacto negativo sobre el medio ambiente alterando las propiedades físicas y químicas de las fuentes hídricas superficiales y subterráneas y de los suelos (Aristizábal, 2015), y también podría generar conflictos con poblaciones involucradas por incomodidades a causa de los malos olores y enfermedades transmitidas por vectores, tal como se plantea en la **Figura 1**.

Figura 1. Árbol de problemas de la contaminación del recurso hídrico y suelos por la vinaza



Fuente: Autores, 2019

Pregunta de investigación

¿Por qué son los reactores de tipo SBR una alternativa viable para el tratamiento de la vinaza y mejorar sus parámetros físicos y químicos?

Justificación

Los residuos de cosecha de caña de azúcar (hojas y cogollos) y la generación de vinazas representan una dificultad para los ingenios azucareros ya que su disposición final da origen a problemas de contaminación y salubridad, como son la presencia de plagas, malos olores, y generación de gases de efecto invernadero, estos últimos producidos por la quema de la caña (Zúñiga & Gandini, 2013).

Por tal razón, se considera viable implementar una tecnología para el tratamiento de este efluente por medio del proceso de lodos activados, porque oxida la materia orgánica biodegradable, a la vez que se eliminan nutrientes como fósforo y nitrógeno, o los convierte en formas menos nocivas (Erijman, Figuerola, Guerrero, & Ayarza, 2011).

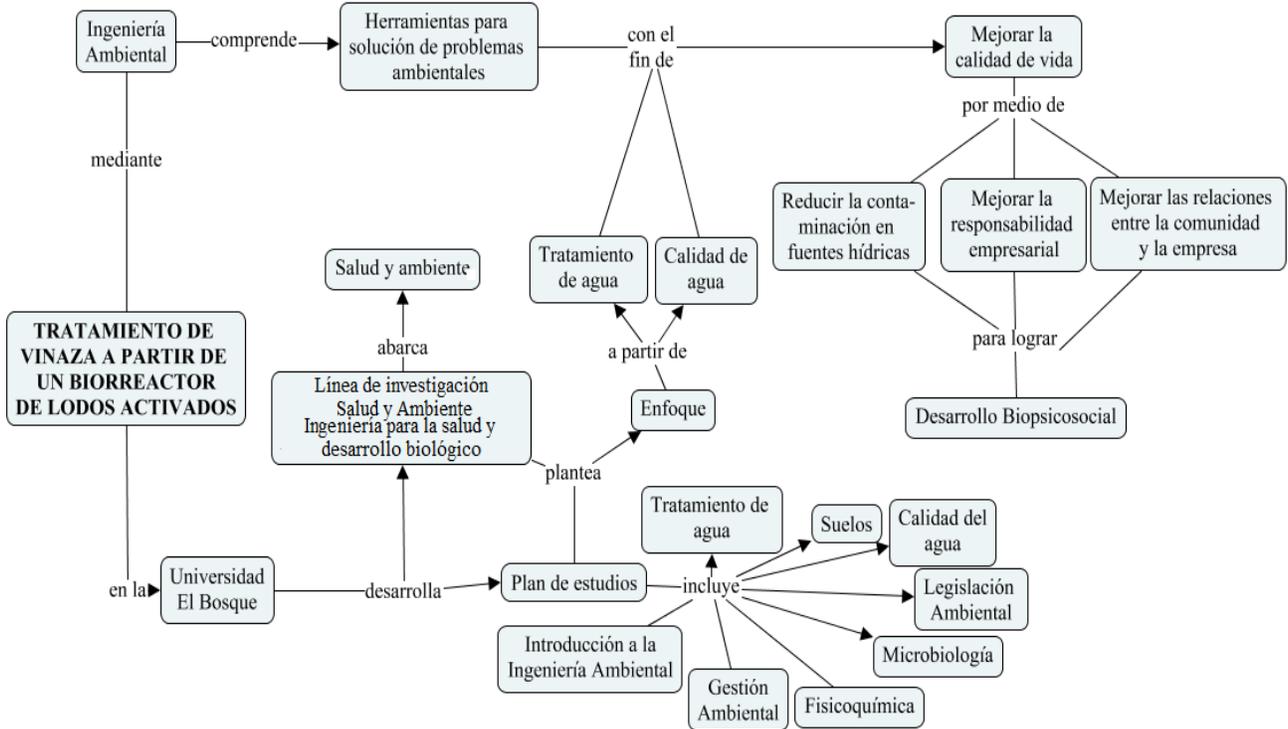
Los reactores SBR han sido usados originalmente para la eliminación de demanda química de oxígeno (DQO) y fosfatos de las aguas residuales, también se puede usar para lograr la nitrificación y desnitrificación, junto con la eliminación de fosfatos. La eliminación biológica de nutrientes y de materia orgánica se obtiene gracias a los ciclos de reacción aerobios, dependiendo de las necesidades del tratamiento (Muñoz & Ramos, 2014). Por otra parte, se usa un medio aerobio, que se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos, y además sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa.

Por estos procesos, se convierten los residuos en subproductos de los cuales se pueden obtener beneficios, no solamente ambientales y económicos, sino sociales, pues el impacto negativo de los problemas mencionados anteriormente disminuiría o sería nulo sobre la población aledaña y los trabajadores del Ingenio. Adicionalmente, este es un procedimiento que aún no ha sido probado para el tratamiento de vinazas, por lo que representa un aporte para el ejercicio investigativo en el campo del tratamiento de residuos agroindustriales de Colombia.

Relación con las ciencias ambientales y en el área investigada

A continuación, en la **Figura 2**, se encuentra un diagrama que relaciona el proyecto de tratamiento de vinaza a partir de biorreactor de lodos activados con las ciencias ambientales, las líneas de investigación de la universidad El Bosque y con la ingeniería ambiental.

Figura 2. Relación del proyecto con las ciencias ambientales



Fuente: Autores, 2018

Objetivos

Objetivo General

Construir y poner en funcionamiento un reactor basado en la tecnología SBR de lodos activados a escala laboratorio, para el tratamiento de vinaza proveniente de un ingenio azucarero (Valle del Cauca, Colombia), con el fin de reducir su carga contaminante.

Objetivos Específicos

- Establecer el diseño del biorreactor a partir de revisión bibliográfica.
- Evaluar el funcionamiento del reactor basado en la tecnología SBR de lodos activados a escala laboratorio que trata la vinaza.
- Determinar el porcentaje de remoción de los parámetros medidos en la vinaza para validar la aplicabilidad del sistema.

Marco de referencia

Estado del arte

En cuanto a los estudios relacionados con el tratamiento de residuos mediante lodos activados y biorreactores, se han encontrado varios relevantes en esta investigación a partir de la búsqueda en diferentes bases de datos. Los documentos fueron seleccionados por la relevancia de su publicación en temas relacionados con tratamientos biológicos, con el diseño de reactores aerobios SBR y el manejo de residuos industriales, principalmente vinaza.

En un estudio realizado en España la Universidad Politécnica de Valencia por Farrás (2017) se tuvo como objetivo lograr el diseño preliminar del tratamiento biológico de una estación depuradora de aguas residuales industriales, esto con el fin de tratar los fangos que son generados en los procesos de depuración (pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario de aguas residuales) y que deberían ser gestionados como residuos. Para ello se propuso la utilización de un desacoplador metabólico TCS (mecanismo que se basa en la introducción al reactor de una serie de reactivos químicos que actúan interfiriendo en el metabolismo de los fangos). Para observar si se producía o no reducción de fango se trabajó en el laboratorio con una planta piloto de dos reactores SBR en paralelo, ambos trabajaron bajo los mismos parámetros de operación, pero uno con reactivo y el otro en ausencia de este para así observar el efecto reactivo en el sistema (Farrás, 2017).

La mayor parte de las aguas residuales son utilizadas para riego agrícola sin un tratamiento previo, lo que representa un serio peligro para la salud humana y de los animales debido al contenido de materia orgánica e inorgánica contaminante. Por ello, en un trabajo realizado en México en la Universidad Autónoma de Chihuahua por Rivas, Nevárez, Bautista, Pérez y Saucedo (2003) se realizaron una serie de experimentos con un sistema biológico (biorreactor de plexiglás) de lecho fijo de flujo ascendente para el tratamiento de aguas residuales, a escala semipiloto, con variación en la altura de lecho y el diámetro del medio de soporte, manteniendo constantes el flujo de agua y aire.

Se realizó un muestreo diario del afluente y del efluente, con el objetivo de determinar las condiciones de operación para obtener la mejor eficiencia en el sistema de tratamiento por medio de parámetros como: DQO, turbidez, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, sólidos totales, nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal. El desempeño del biorreactor fue evaluado con base en las diferencias de cargas orgánicas entre el afluente y el efluente, utilizando las medidas de DQO, la turbidez y el oxígeno disuelto. Los resultados de este estudio muestran que la más alta eficiencia de remoción de materia orgánica contaminante (91.9%) se obtuvo cuando el biorreactor fue operado con una altura de lecho de 0.65 m y un tamaño de partícula de 1.87 mm. Además, se observó una gran remoción de metales pesados en estas condiciones (Rivas, Nevárez, Bautista, Pérez, & Saucedo, 2003).

También, un trabajo realizado por Méndez, Miyashiro, Rojas, Cotrado y Carrasco (2004) en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) en Perú, se realizó la prueba de tratamiento de aguas residuales a escala laboratorio por medio de un módulo compuesto por seis mini reactores. Con los resultados analíticos obtenidos se determinaron las constantes cinéticas de

crecimiento biológico, utilizando el método de lodos activados. En este estudio se evaluó que los microorganismos presentes en los sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla (SSVLM) tienen un rol fundamental en la degradación de la materia orgánica, la presencia y abundancia indican el nivel de tratamiento de los lodos activados. Entre los más eficientes encontrados en el sistema evaluado tenemos a los Protozoarios fijos, rotíferos y ciliados nadadores.

Por otro lado, en un estudio hecho por Delgado, Rennola y Lugo (2006), se diseñó y construyó una planta piloto, para el tratamiento de vinaza proveniente de una destilería en el Estado de Mérida (Venezuela), por lodos activados, constituida por: un tanque de alimentación, una cámara de reacción, un sistema de aireación (reactor aireador) y un sedimentador de cuerpo cilíndrico y fondo cónico (ambos construidos con plexiglás), una bomba de reciclo y accesorios de conexión. La planta tiene la configuración general de una planta de tratamiento de aguas residuales con lodos activados convencional, no obstante, se añadieron láminas divisoras en el interior del reactor para aumentar su versatilidad y funcionalidad.

En cuanto a la fase experimental para el tratamiento de las aguas residuales el estudio constó de: selección y aclimatación del inóculo (cepa liofilizada de *Candida Utilis* suministrada por el Laboratorio de Alimentos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes), caracterización del afluente, puesta en marcha de la planta piloto, muestreo y captación y, finalmente se determinó los parámetros físicos y químicos como: pH, contenido de azúcar, Turbidez, DBO5 y DQO. La planta piloto fue utilizada para el tratamiento aeróbico de diversas aguas residuales. El caudal de alimentación varió entre 0.1-0.5L/h. La remoción de DBO, respecto al efluente, fue de 96.7% y 89.5% en ocho horas de tratamiento para cada una de las pruebas realizadas. Mientras que, para la DQO, se obtuvo una remoción total de 88.9% para la prueba uno y de 33.3% para la prueba dos; lo cual reflejó la efectividad del tratamiento en la purificación del efluente (Delgado, Rennola, & Lugo, 2006).

Teniendo en cuenta un estudio realizado en Colombia por Pabón y Suárez (2009), el cual tuvo lugar en la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Frigorífico Frigofrontera Ltda., constituida por un sistema de tratamiento primario que incluye cribado, desarenador, trampa de grasas y sedimentación, un reactor de lodo activo con recirculación para el tratamiento secundario y un filtro descendente como tratamiento terciario. El caudal tratado fue en promedio de 1,38 L/s; el reactor de lodo activo tuvo un volumen de 144 m³ y un tiempo de retención celular de dos días. Los niveles de oxígeno en el reactor se garantizaron mediante la inyección de aire con equipos de alta eficiencia. Las concentraciones de los parámetros básicos del agua residual fueron: 5242,13 mg/L de DBO5; 9039,75 mg/L de DQO y 2972,69 mg/L de SS. El arranque de la planta de tratamiento se realizó durante el mes de febrero de 2006 y a partir de esa fecha ha operado continuamente, obteniéndose una eficiencia de remoción en carga de DBO5 de 89,73 %, 89,03 de DQO y 94,09 de SS. Los lodos generados por el proceso fueron tratados mediante cribado donde se separan los sólidos del agua residual. El líquido fue retornado a los sedimentadores y el sólido fue compostado.

En otro caso de estudio, se realizó el diseño, la construcción, la puesta en marcha y operación de un biorreactor de lodos activados en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad El Bosque, para el tratamiento de aguas residuales a escala laboratorio, el cual contaba con una capacidad total de 18 litros, de los cuales 12 correspondían a la zona de aireación y seis litros a la zona de sedimentación, estas zonas estaban separadas por medio de un deflector regulable. Este sistema

fue evaluado por medio de agua residual sintética de baja carga y composición conocida, que durante periodos de tiempo se realizaron determinaciones de pH, temperatura y oxígeno disuelto; así mismo se determinaron tres veces por semana la DQO en el afluente y el efluente y los sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM). La información obtenida de estos análisis permitió observar que el sistema tuvo eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de DQO entre 85 y 90% y la determinación de coeficientes cinéticos de crecimiento biológico Y , k , k_d , a , b (Varila & Díaz, 2008).

Con el paso de los años y debido a las grandes cantidades generadas de vinaza y sus efectos, se ha empezado a investigar en nuevas aplicaciones en pro del aprovechamiento de sus propiedades físicas y químicas por distintas empresas pioneras entre las cuales se puede citar a Maizena, Sulco, Ingenio Providencia, Ceniuva y algunos particulares como el Ing. G. Berón, quién trabaja en busca de múltiples alternativas de tipo químico. Algunos estudios realizados en el ICA, la Universidad Nacional y Sucromiles han demostrado la importancia del uso de este subproducto en la recuperación de suelos afectados por una alta saturación de sodio destacándose la rapidez y eficiencia del proceso. En la era del alcohol carburante, Cenicaña y los Ingenios Azucareros iniciaron trabajos dirigidos a explorar su uso como fertilizante (García & Rojas, 2006).

En el año 2003 CENICAÑA inició investigaciones en los ingenios Manuelita y Riopaila, con el fin de establecer el efecto de aplicaciones sucesivas de vinaza (realizadas allí durante 20 años), sobre la producción de caña de azúcar, contenidos de sacarosa y propiedades químicas del suelo. Las cantidades de vinaza aplicadas por corte de caña, en el Ingenio Manuelita fueron aproximadamente de 425 m³ /ha y en el Ingenio Riopaila, 390 m³ /ha aproximadamente (Velásquez, 2009)

En el año 2004 en el Cerrito Palmira y Candelaria se realizó un diagnóstico preliminar por parte de la CAR del Valle del Cauca en cuanto a la aplicación de la matriz problema y se detectó que en los primeros 20 cm del suelo por la disposición del residuo en las suertes en el orden de 7650 m³/ha se encontraron 45.900 kg de k₂O/ha durante 20 años. Además de un aumento ligero del pH e incremento de los porcentajes de materia orgánica, Mg y Na intercambiables y conductividad eléctrica; también, aumentaron notoriamente los contenidos de P disponible y K intercambiable y alteración en los procesos de óxido reducción en los suelos y aguas. En aguas subterráneas se presentaron valores altos de conductividad eléctrica, sulfatos, calcio, magnesio, cloruros, bicarbonatos. Por otra parte, se alteraron los iones en la composición natural del agua lo que le transfirió un olor y sabor desagradable al recurso hídrico subterráneo, producto de la alta carga orgánica impuesta (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2014).

Además de contar con tecnologías como los reactores de tipo SBR, se referencia un trabajo realizado por Ausecha y Vera (2016) en el cual los autores se centraron en optimizar la capacidad de degradación y disminución de algunos parámetros fisicoquímicos de la vinaza por medio de un tratamiento mixto con *Komagataeibacter kakiaceti* GM5 y *Trametes versicolor* DSM 3086. Se determinó como concentración óptima la vinaza al 60% v/v y se realizaron 5 tipos de tratamientos donde se evaluó la acción de un cultivo mixto simultáneo y de dos cultivos mixtos secuenciales, obteniendo que el tratamiento mixto simultáneo presentó el mejor porcentaje de remoción de DQO (56,1%) e importantes valores de remoción de turbidez (45%) y color (27,4%), así como una disminución en la toxicidad con un valor de EC50 del 4,72%.

Marco teórico-conceptual

Tratamiento biológico

También llamado tratamiento secundario, es un proceso que se usa principalmente para convertir la materia orgánica fina coloidal y disuelta en el agua residual en floc biológico sedimentable y en sólidos inorgánicos que pueden ser removidos por medio de tanques de sedimentación. Estos procesos se emplean junto con procesos físicos y químicos para el tratamiento preliminar y primario del agua residual (Ramos, 2017).

Reactor aerobio

Una planta de lodos activados es un sistema de mezcla completa, el ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos que pueden estar ubicados en el lecho o superficie de este. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de sedimentación para ser separados por decantación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema (Varila & Díaz, 2008).

Existe en todo este proceso un Metabolismo Endógeno durante el periodo en el que una concentración sustancial del sustrato se encuentra presente para proporcionar alimentación abundante para mantener el crecimiento de microorganismos, el cual ocurre cuando la concentración de sustrato ha disminuido considerablemente, no hay suficiente alimento para mantener su crecimiento, entonces estos empiezan a consumir sus “microorganismos compañeros” como alimento. Conforme avanza esta interacción, la concentración de Sólidos Suspendidos Volátiles desciende ya que la velocidad de destrucción de células de microorganismos excede la de síntesis de nuevas células, determinando así la velocidad a la cual degradan un residuo específico. El estudio de la cinética del tratamiento biológico aerobio suministra información básica necesaria para desarrollar el tamaño adecuado de los reactores biológicos aerobios (Ramalho, s.f.)

Proceso de lodos activado

Este proceso involucra la producción de una masa activa de microorganismos capaces de estabilizar de manera aerobia un desecho. El proceso de lodos activados consiste en un reactor llamado tanque de aireación, un tanque de sedimentación, reciclado de sólidos al tanque de aireación procedente del tanque de sedimentación y una línea de purga, sin embargo, puede tener variaciones y modificaciones para ser empleados con el fin de conseguir varios grados de remoción de sólidos suspendidos y reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de cinco días (DBO_5) (Ramos, 2017).

Vinaza

Las vinazas son el residuo líquido generado por las industrias sucroquímicas o alcoholeras durante el proceso de fermentación de la caña de azúcar, para la obtención de bioetanol. Este residuo o subproducto que contiene una gran cantidad de impurezas, se caracteriza por ser un líquido con un gran contenido de sólidos suspendidos, de color marrón o café oscuro, sabor a malta y olor a miel final. En

promedio se generan de 10 a 15 litros de vinaza por cada litro de alcohol producido, dependiendo de los equipos disponibles en la destilería (Aristizábal, 2015).

Los estudios realizados a la vinaza de caña de azúcar han mostrado que es un residuo altamente corrosivo y contaminante de las aguas, en general, contiene 93% de agua y siete por ciento de sólidos; el 75% de los sólidos son orgánicos y el 25%, inorgánicos; de estos últimos, que presenta en su composición química altos contenidos de materia orgánica, potasio y calcio, así como cantidades moderadas de nitrógeno y fósforo. Sin embargo, la composición química de la vinaza depende de la materia prima que se utilice, de las condiciones climáticas, del suelo y del proceso de elaboración del alcohol (Leal, Chirinos, Leal, Morán, & Barrera, 2003).

Para determinar la carga contaminante presente en las vinazas de residuos de caña, es necesario medir parámetros físicos y químicos como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitratos, fosfatos, Sólidos Suspendedos Totales (SST), Sólidos Disueltos (SD), Sólidos Totales (ST), Conductividad Eléctrica (CE), pH los cuales son los principales a medir al tratarse de los usos del agua y vertimientos de residuos líquidos a fuentes hídricas, lo cual está reglamentado en los Decretos 1594 de 1984 y 3930 de 2010, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (Zúñiga & Gandini, 2013).

Reactor SBR

Un reactor discontinuo secuencial (SBR) se puede definir como un sistema de lodos activados, cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de llenado y vaciado. Los procesos que intervienen son similares a los de un proceso convencional de lodos activados. Ambos sistemas intervienen la mezcla, reacción y sedimentación, pero se diferencian en que en las plantas convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que en un sistema SBR los procesos tienen lugar en el mismo tanque (Muñoz & Ramos, 2014).

El tratamiento biológico dentro del reactor para el tratamiento de las aguas residuales por los lodos activados es una alternativa muy eficiente, especialmente porque poseen una gran variedad de microorganismos capaces de remover materia orgánica, microorganismos patógenos, y disminución de carga de nitrógeno y fósforo) (Charpentier, 2014). Pues los componentes biológicos activos en ellas son protozoos, algunos metazoos, hongos y bacterias. Estas últimas comprenden aproximadamente el 95 % de la biomasa y son los constituyentes que llevan a cabo la mayoría de las transformaciones de la materia orgánica contenida en los efluentes. A pesar de que sea utilizado para las A.R.D., se adapta de muy buena manera para tratar los efluentes industriales en la medida en que éstos son biodegradable y también depende del desarrollo de una biomasa floculenta capaz de sedimentarse y compactarse adecuadamente (Erijman, Figuerola, Guerrero & Ayarza, 2011). En este caso los lodos activados serán tomados de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad El Bosque ubicada en la sede Chía.

Parámetros de medición

Potencial de hidrógeno pH. Determina la acidez o alcalinidad del afluente en términos de concentración de iones de hidrógeno H^+ (IDEAM, 2007).

Conductividad eléctrica (CE). Es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición. Las soluciones de la mayor parte de los compuestos inorgánicos son buenas conductoras. Las moléculas orgánicas al no disociarse en el agua conducen la corriente en muy baja escala (IDEAM, 2006).

Sólidos disueltos totales (SDT). Es una medida de la materia en una muestra de agua, que no pueden ser removidos por un filtro tradicional. Esta suma de todos los minerales, metales, y sales disueltos en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua (Sigler & Bauder, 2012).

Demanda química de oxígeno (DQO). Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (IDEAM, 2007).

Nitritos y nitratos. Nitratos y nitritos son compuestos iónicos que se encuentran en la naturaleza, formando parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato (NO_3^-) es la forma estable de las estructuras oxidadas del nitrógeno, y a pesar de su baja reactividad química puede ser reducido por acción microbiológica. El nitrito (NO_2^-), es oxidado con facilidad por procesos químicos o biológicos a nitrato, o bien reducido originando diversos compuestos (Antón & Lizaso, 2001).

Turbiedad. Es una expresión de la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida en vez de transmitida sin cambios en la dirección del nivel de flujo a través de la muestra: es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. Es causada por materia suspendida y coloidal tal como arcilla, sedimento, materia orgánica e inorgánica dividida finamente, plancton y otros microorganismos microscópicos (IDEAM, 2007).

Color. Es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. No descalifica a un agua como potable, pero la puede hacer rechazable por estética. Las medidas de color se hacen en laboratorio por comparación o fotómetro. La eliminación suele hacerse por coagulación-floculación con posterior filtración o la absorción en carbón activo (Bonsai Menorca, 2019).

Sólidos suspendidos totales (SST). Es un tipo de sólido presente en las aguas, transportado gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua y que no se disuelven en ella (IDEAM, 2007).

Sólidos totales secados (STS). Se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C. El valor de los sólidos totales incluye materias disueltas (sólidos disueltos totales: porción que pasa a través del filtro) y no disuelto (sólidos suspendidos totales: porción de sólidos totales retenidos por un filtro) (IDEAM, 2007).

Oxígeno disuelto (OD). Es el oxígeno necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida aerobia. Es ligeramente soluble en el agua; la cantidad real de oxígeno que puede estar presente en la solución está determinada por la solubilidad del gas, la presión parcial del gas en la atmósfera, la temperatura, y a pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos) (IDEAM, 2004).

Marco legal

En seguida se presenta el marco legal (**Tabla 1**) que es aplicable al proyecto yendo de algunas leyes generales en Colombia y haciendo énfasis en normas técnicas y resoluciones aplicables, teniendo en cuenta la vinaza como residuo industrial para compararlo con las normas y decretos.

Tabla 1. Instrumentos legales relacionados con el vertimiento, tratamiento y disposición de aguas residuales industriales

<i>Instrumento legal</i>	<i>Descripción</i>
Decreto 2811 de 1974	<p>Artículo 1. El ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social.</p> <p>Artículo 2. Fundado en el principio de que el ambiente es patrimonio común de la humanidad y necesario para la supervivencia y el desarrollo económico y social de los pueblos, este Código tiene por objeto:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguren el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de estos y la máxima participación social, para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio nacional.2. Prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de los recursos naturales no renovables sobre los demás recursos.3. Regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la administración pública, respecto del ambiente y de los recursos naturales renovables y las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos y de ambiente.
Ley 9 de 1979	<p>Artículo 2. Cuando en esta Ley o en sus reglamentaciones se hable de aguas, se entenderán tanto las públicas como las privadas. Las normas de protección de la calidad de las aguas se aplicarán tanto a unas como a otras</p> <p>Artículo 8. La descarga de residuos en las aguas deberá ajustarse a las reglamentaciones que establezca el Ministerio de Salud para fuentes receptoras.</p> <p>Artículo 10. Todo vertimiento de residuos líquidos deberá someterse a los requisitos y condiciones que establezca el Ministerio de Salud teniendo en cuenta las características del sistema de alcantarillado y de la fuente receptora correspondiente.</p>

Constitución Política de 1991	<p>Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines</p> <p>Artículo 332: El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes (Consejo Superior de la Judicatura, 2016).</p>
Ley 99 de 1993	<p>Artículo 42: Tasas Retributivas y Compensatorias. La utilización directa o indirecta de la atmósfera, del agua y del suelo, para introducir o arrojar desechos o desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen, humos, vapores y sustancias nocivas que sean resultado de actividades antrópicas o propiciadas por el hombre, o actividades económicas o de servicio, sean o no lucrativas, se sujetará al pago de tasas retributivas por las consecuencias nocivas de las actividades expresadas (Congreso de Colombia, 1993).</p> <p>Artículo 43: Reglamentado por el Decreto Nacional 155 de 2004. Tasas por Utilización de Aguas. La utilización de aguas por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, dará lugar al cobro de tasas fijadas por el Gobierno Nacional que se destinarán al pago de los gastos de protección y renovación de los recursos hídricos, para los fines establecidos por el artículo 159 del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, Decreto 2811 de 1974 (Congreso de Colombia, 1993).</p> <p>Artículo 66: Competencia de Grandes Centros Urbanos. Modificado por el art. 13, Decreto Nacional 141 de 2011, Modificado por el art. 214, Ley 1450 de 2011. Los municipios, distritos o áreas metropolitanas cuya población urbana fuere igual o superior a un millón de habitantes (1.000.000) ejercerán dentro del perímetro urbano las mismas funciones atribuidas a las Corporaciones Autónomas Regionales, en lo que fuere aplicable al medio ambiente urbano. Además de las licencias ambientales, concesiones, permisos y autorizaciones que les corresponda otorgar para el ejercicio de actividades o la ejecución de obras dentro del territorio de su jurisdicción, las autoridades municipales, distritales o metropolitanas tendrán la responsabilidad de efectuar el control de vertimientos y emisiones contaminantes, disposición de desechos sólidos y de residuos tóxicos y peligrosos, dictar las medidas de corrección o mitigación de daños ambientales y adelantar proyectos de saneamiento y descontaminación (Congreso de Colombia, 1993).</p>
Norma Técnica Colombiana NTC-ISO	Calidad del Agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación

5667-3. (2004)	<p>y manejo de las muestras.</p> <p>3. Preservación de muestras</p> <p>3.1 Consideraciones Generales</p> <p>Las aguas, en particular las aguas de superficie y las aguas residuales, son susceptibles de cambio como resultado de reacciones físicas, químicas o biológicas que pueden ocurrir entre el tiempo del muestreo y el análisis. La naturaleza y velocidad de estas reacciones son tales que, si no se toman las precauciones necesarias durante el muestreo, el transporte y el almacenamiento, para determinantes específicos, las concentraciones determinadas serán diferentes de las que existían en el momento del muestreo (ICONTEC, 2014).</p>
Resolución 2086 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.	<p>Artículo 1: La presente resolución tiene por objeto establecer la metodología para la tasación de las multas consagradas en el numeral 1° del artículo 40 de la Ley 1333 del 2009, la cual deberá ser aplicada por todas las autoridades ambientales.</p> <p>Artículo 3: Se definen los criterios a tener en cuenta en la metodología para la tasación de las sanciones pecuniarias.</p> <p>Artículo 7: <i>Grado de afectación ambiental</i>: Para la estimación de esta variable se deberá estimar la importancia de la <i>afectación</i> mediante la calificación de cada uno de los atributos, atendiendo los criterios y valores presentados.</p> <p>(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).</p>
Resolución 1207 de 2014	<p>Artículo 11: monitoreo y seguimiento al usuario receptor para presentar su aprobación ante la Autoridad Ambiental Competente y de forma simultánea la solicitud para la obtención o modificación de la Concesión de Aguas para el uso de aguas residuales tratadas, la Licencia Ambiental o el Plan de Manejo Ambiental a ser desarrollado durante la vigencia de la autorización ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).</p>
Resolución 0631 de 2015	<p>Artículo 9: parámetros físicos y químicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales de las actividades productivas de agroindustria y ganadería (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).</p>

Fuente: Autores con referencia en normas legales, 2019

Marco geográfico

El sector azucarero colombiano se encuentra principalmente ubicado en el valle geográfico del río Cauca, donde abarca 47 municipios. En esta región hay 225.560 hectáreas sembradas con caña de azúcar, de las cuales, el 25% corresponde a tierras propias de los ingenios y el restante 75% a más de 2.750 cultivadores de caña, quienes abastecen a 13 ingenios de la región. Dentro de estos 13 ingenios,

hay 5 que cuentan con destilería de alcohol, y para el desarrollo del proyecto se tomó como objeto de estudio uno de ellos (ASOCAÑA, 2019).

El ingenio cuenta con 12000 ha de área de influencia total donde abarca siete municipios del departamento del Valle. Dentro de las fuentes hídricas cercanas al ingenio, se encuentra el río Párraga, y los zanjones Chontaduro y Potoco. En el área que abarcan se encuentran variedades de caña de azúcar tipo CC 01-1940, y sus proveedores cuentan con 22000 ha de caña sembrada en el departamento. Se caracteriza por tener un 60% de suelos molisoles y limo-arcillosos (ver **Anexos**).

Por otro lado, la zona donde se ubica la empresa cuenta con fauna y flora endémica de la región; donde existen alrededor de 80 especies de aves como: pava, colibrí de pico dorado, compás, entre otras; gran cantidad de reptiles, principalmente. Además, en la flora característica de la región se resaltan las palmas, naidí, tagua, chontaduro, entre otras; que ofrecen diferentes servicios ecosistémicos (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2012).

Actualmente en el ingenio se generan entre 9000 m³ - 10000 m³ de vinaza al mes, las cuales se almacenan en piscinas de capacidad igual a 20000 m³ y que no generan daños a las fuentes de aguas subterráneas. Según la información proporcionada en la entrevista, se indica que el 52% de este residuo es tratado en una planta de compostaje que se utiliza como vector de aplicación de abono a los cultivos y el porcentaje restante se aplica como fertilizante. En la planta de tratamiento se trata vinaza y cachaza, que son los residuos voluminosos de la destilería. A pesar de que la aplicación del residuo es beneficiosa para los cultivos, la tecnología de tratamiento podría llegar a ser más eficiente y aprovechar más su potencial (ver **Anexos**).

Marco institucional

Las entidades que se relacionan directamente con el trabajo de grado son: La Universidad El Bosque, por la disposición de sus instalaciones para procedimientos experimentales y una trazabilidad durante toda la elaboración y ejecución del proyecto, y el Ingenio del caso de estudio, ubicado en Valle del Cauca, porque la matriz problema que se utilizó para la evaluación del funcionamiento del reactor proviene de esta empresa. De igual manera, otras entidades que se relacionan de manera indirecta son: la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), pues el Ingenio se encuentra bajo su jurisdicción, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), porque el proyecto se enmarca bajo sus normas.

Metodología

Metodología de la investigación

Área y línea de investigación

La metodología del proyecto se enmarca en el área de investigación de **Salud Ambiental** y enfoque en las líneas de investigación de **Salud Ambiental** e **Ingeniería para la salud y el desarrollo biológico**. Esto se justifica en que su enfoque es el tratamiento de un residuo industrial que puede generar afectaciones tanto en la salud pública como la salud del ambiente, a partir de una tecnología alternativa de reducción de carga contaminante.

Enfoque de investigación

El enfoque de esta investigación es de tipo **cuantitativo** puesto que se basa en un diseño experimental para tratamiento de residuos industriales, donde se llevará a cabo la manipulación de variables en una muestra, medición de parámetros por diferentes técnicas científicas, y validación interna de la situación experimental (Domínguez, 2007).

Alcance de la investigación

El alcance de la investigación es **explicativo** porque busca responder las causas de las afectaciones que pueden desarrollarse en el ambiente por este residuo industrial, y que pueden perjudicar la salud ambiental (Sampieri, 2014).

Método de la investigación

El método de la investigación es **analítico-sintético**, donde el análisis se produce mediante la síntesis de las propiedades del proyecto, mientras que la síntesis se realiza sobre la base de resultados del análisis. Tiene un fundamento objetivo en la realidad en el cual las variables presentan una interacción y se da un procesamiento de la información (Pérez & Rodríguez, 2017).

Técnica

La técnica que fundamenta el marco metodológico es la **revisión bibliográfica** en la cual se determina la relevancia e importancia del tema que se desarrolla a lo largo del proyecto, así mismo la revisión permite asegurar la originalidad del tema dentro del campo investigativo, facilita la búsqueda dentro de otros artículos en fuentes bibliográficas. Para esta técnica es necesario contar con material informativo científicamente respaldado (Gómez, Fernando-Navas, Aponte & Betancourt, 2014).

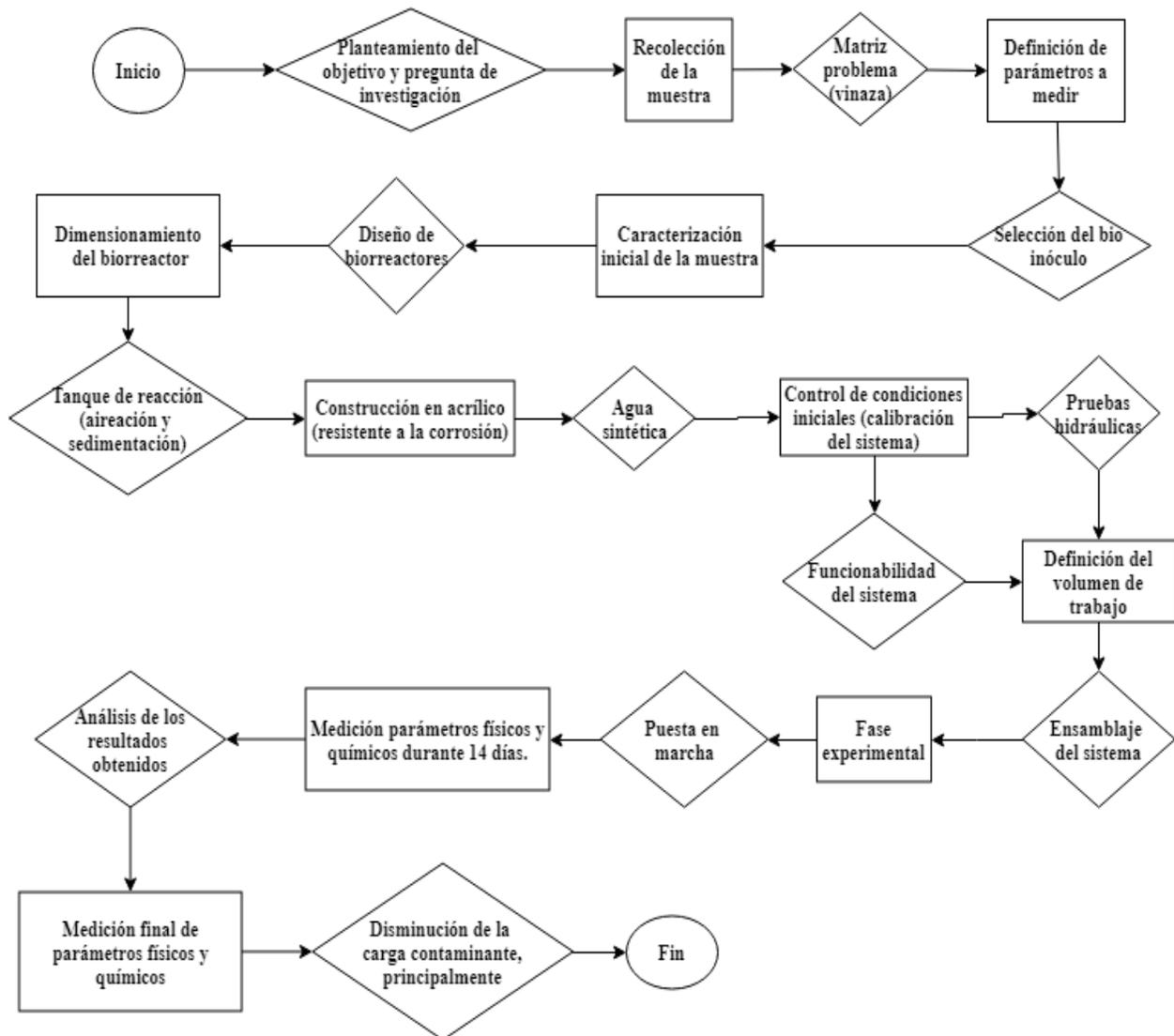
Instrumentos

Para la formulación, conceptualización y desarrollo del proyecto ha sido necesario la utilización de libros, revistas de divulgación o de investigación científica, sitios Web y demás información necesaria para iniciar la búsqueda (Gómez, Fernando, Aponte & Betancourt, 2014) en diferentes bases de datos con información verídica y respaldada científicamente, algunas de ellas son: Base de datos de la Universidad El Bosque, Google Académico y Scientific Electronic Library Online (SciELO).

Metodología del proyecto

A continuación, en la **Figura 3**, se expone la metodología empleada para la ejecución del proyecto, en la cual se integran de manera generalizada los objetivos y las actividades a realizar. Y posteriormente, se describen detalladamente en cada uno de los objetivos específicos, las metodologías empleadas en la fase experimental de la investigación.

Figura 3. Flujograma de metodología



Fuente: Autores, 2019

Objetivo específico 1: Establecer el diseño del biorreactor a partir de revisión bibliográfica.

Partiendo de la revisión bibliográfica y la búsqueda realizada en diferentes bases de datos donde se usaron palabras claves como biorreactor, vinaza, tratamiento primario, reactor SBR, entre otros, y teniendo en cuenta los años de publicación, se encontró el diseño que se tomó como base para definir los lineamientos del proyecto, en Reynolds y Richards (1996).

Objetivo específico 2: Evaluar el funcionamiento del reactor basado en la tecnología SBR de lodos activados a escala laboratorio que trata la vinaza.

La parte experimental del proyecto tuvo lugar en el laboratorio de investigación de la Universidad El Bosque, donde se adecuó el sistema en un lugar que tuviese suficiente ventilación y espacio para realizar el montaje. Con el fin de realizar seguimiento y asegurar el funcionamiento del tratamiento, se estableció un control con agua sintética que trabajó bajo las mismas condiciones de montaje y operación.

-Determinación del volumen de trabajo.

Un estudio realizado por Carrasquero, Rodríguez, Bernal y Díaz (2017), determinó que el volumen efectivo de trabajo para un sistema de tratamiento de residuos no domésticos con una elevada carga orgánica debía ser del 50%; utilizaron un reactor para tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos cárnicos. Para este caso, se decidió trabajar con volumen del 60%, teniendo en cuenta que cada muestreo requería tomar una alícuota de 255 mL del volumen inicial para la medición de los parámetros. De este modo, no fue afectado el correcto funcionamiento del sistema a medida que disminuía el volumen de trabajo, pues nunca bajó más del 50% en los 15 días.

De esa capacidad óptima se utilizó el 10% para adicionar el cultivo mixto de microorganismos. En la **Tabla 2** se presentan las cantidades que se usaron para cada uno de los reactores:

Tabla 2. Volúmenes de vinaza y agua sintética para cada biorreactor

<i>Biorreactor para vinaza</i>	
Volumen vinaza	7,56 L
Volumen microorganismos	0,84 L
Volumen óptimo de trabajo	8,4 L
<i>Biorreactor para agua sintética</i>	
Volumen agua sintética	7,56 L
Volumen microorganismos	0,84 L
Volumen óptimo de trabajo	8,4 L

Fuente: Autores, 2019

En la **Tabla 3** se especifican las concentraciones utilizadas para la preparación del agua sintética basadas en el estudio realizado por (Varila & Díaz, 2008); que se utilizó como control del tratamiento:

Tabla 3. Concentraciones utilizadas para la preparación de agua sintética

<i>Compuesto</i>	<i>Cantidad (mg/L)</i>
Gelatina	34
Almidón	171
Leche en polvo	102
Jabón de tocador	3
Sulfato de magnesio	3
Fosfato de potasio	44,5
Sulfato de amonio	74,2
Bicarbonato de sodio	150

Fuente: Autores, 2019

Se dispuso en cada uno de los reactores, por separado, la mezcla que iba a ser tratada. El volumen que se tomó en cada tiempo de muestro fue de 255 ml aproximadamente para cada uno de los biorreactores. En el caso de la vinaza fue necesario realizar diluciones de 1:100, y 1:1000 debido a que se requería que la matriz de análisis coincidiera con los rangos de detección de los equipos y técnicas utilizados.

-Montaje y adecuación del sistema: temperatura aireación e inóculo microbiano

Ambos sistemas se encontraban a temperatura ambiente y se les adicionó el volumen correspondiente al cultivo de microorganismos del reactor ECOPAC®200, que fueron obtenidos del reactor biológico de una planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en el Campus Chía de la Universidad El Bosque, donde se realiza la oxidación de materia orgánica (Tecnologías Ecológicas Teco, s.f.).

Objetivo específico 3: Determinar el porcentaje de remoción de los parámetros medidos en la vinaza para validar la aplicabilidad del sistema.

-Medición de parámetros

En total se realizaron 6 muestras, las 3 primeras muestras fueron tomadas cada 48 horas y las últimas tres, cada 96 horas. Antes de la puesta en marcha, se tomó la muestra inicial y posteriormente se realizó la medición de los parámetros físicos y químicos con sus respectivas técnicas e instrumentos que se describen en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Técnicas e instrumentos

<i>Técnica</i>	<i>Instrumento</i>
Aireación constante	Bomba de aireación Xilong -Aquarium Air Pump-
Medición de pH	Multiparámetro pH-ISE Meter de Denver Instrument
Medición de conductividad eléctrica (CE)	Multiparámetro pH-ISE Meter de Denver Instrument
Medición de sólidos disueltos totales (SDT)	Multiparámetro pH-ISE Meter de Denver Instrument
Determinación de oxígeno disuelto (OD)	Disolved Oxygen Test Kit de HANNA Instruments
Medición de turbiedad	HACH 21000N Turbidimeter
Medición de color	Hanna Instruments HI 83099 COD and Multiparameter Photometer
Determinación de nitritos	MColorstest™ de Merk KGaA
Determinación de nitratos	MColorstest™ de Merk KGaA
Medición de DQO	Thermo Spectronic Genesys 5, Spectroquant TR 420
Determinación de sólidos totales secados	Balanza Adverturer™ OHAUS® y horno Memmert
Determinación de sólidos suspendidos totales	Balanza Adverturer™ OHAUS® y horno Memmert

Fuente: Autores, 2019

El pH, la conductividad eléctrica (CE) y los Sólidos Disueltos Totales (SDT) se midieron con el multiparámetro de marca Denver Instrument Model 225 pH-ISE Meter. Se realizó in situ, introduciendo y lavando el electrodo con agua destilada cada vez que se pasaba de un biorreactor al otro, para que los resultados no se vieran alterados, hasta que el equipo arrojará los datos.

Para la prueba de determinación de sólidos secados totales se siguió el procedimiento propuesto por el IDEAM en 2007 para este parámetro. En un vaso de precipitado de masa conocida, se tomó una alícuota de 30 mL de la muestra problema y se pesó nuevamente. Después se secó la muestra durante 2 horas en el horno Memmert a 105° C, para pesarlo nuevamente cuando se enfriara el beaker. El procesamiento de los datos se realizó utilizando la siguiente fórmula (IDEAM, 2007).

$$STS = \frac{(A - B)}{V} \times 1000$$

Dónde:

STS: Sólidos secados totales (mg/L)

A: Peso final del vaso de precipitado con el residuo seco, en miligramos.

B: Peso inicial del vaso, tarado en miligramos

V: Volumen de muestra desecada, en litros

En el caso de sólidos suspendidos totales, se realizó un proceso de filtración por gravedad. Se pesó un papel filtro, se adecuó el montaje y se dispuso la muestra (30 mL). Una vez filtrada totalmente, se pesó en un crisol de masa conocida y se llevó al horno a secar durante 2 horas a 105° C. Posteriormente se procedió a pesar nuevamente y el procesamiento de los datos se realizó de la siguiente forma.

$$SST = \frac{(C - D)}{V} \times 1000$$

Dónde:

SST: Sólidos secados totales (mg/L)

C: Peso final papel filtro con el residuo seco, en miligramos.

D: Peso inicial del papel filtro y muestra, en miligramos

V: Volumen de muestra desecada, en litros

Las concentraciones de nitritos y nitratos se midieron con los kit MColortest™ de MERCK KGaA (Test Nitritos y Test Nitratos), para las cuales se siguieron las instrucciones especificadas en la guía del kit y se hacía la lectura de los resultados con base a la tarjeta colorimétrica.

La turbiedad se midió con el Turbidímetro HACH 21000N. Para ello, fue necesario calibrarlo antes de la toma de resultados colocando cada una de las soluciones de turbiedad específica dentro del equipo, al final se disponían la matriz problema en un tubo de muestra del equipo y este arrojaba el valor correspondiente al parámetro.

El color se midió con el equipo Hanna Instruments HI 83099 COD and Multiparameter Photometer. Para ello fue necesario calibrar el equipo con un tubo que contenía agua destilada, antes de introducir cada una de las muestras. Posteriormente se colocaba la matriz problema y el equipo arrojaba el valor correspondiente al parámetro.

Para la determinación de la DQO, se preparó la solución patrón que correspondía a Biftalato de Potasio con DQO de 1000 mg/L O₂, también se tenía en cuenta cierta cantidad de agua destilada que correspondía al blanco para poder tomar las mediciones. se tomaron alícuotas definidas previamente de agua sintética y de vinaza diluida a razón de 1:1000, según la guía spectroquant para DQO de Merck. Luego se determinaron las concentraciones de solución A y B que fueron adicionadas en los tubos con las muestras, estos fueron llevados al termoreactor (Spectroquant TR 420) durante 2 horas a 148 °C, una vez finalizado este tiempo se dejaron enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se

introdujeron en el espectrofotómetro (Thermo Spectronic Genesys 5) que arrojaba el dato correspondiente a la DQO.

La concentración de Oxígeno Disuelto (OD) se realizó con el kit Dissolved Oxygen Test Kit de HANNA Instruments. La lectura de los resultados se hizo después de hacer la titulación según las instrucciones especificadas en la guía del kit.

-Cálculo de porcentaje de remoción

Posteriormente, se realizó el registro de los datos para calcular la remoción porcentual de CE, SDT, STS, SST, nitritos, nitratos, turbiedad, color y DQO, con el fin de determinar la capacidad de tratamiento del biorreactor SBR, para el caso del OD se representa el aumento del parámetro y para el pH un rango de variación. Este porcentaje se estimó con la relación aquí descrita (Gutiérrez, Valencia & Aragón, 2014):

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{\text{Concentración entrada} - \text{Concentración salida}}{\text{Concentración entrada}} \times 100$$

-Comparación de parámetros con Resolución 0631 de 2015

Una vez medidos los parámetros, se realizó una comparación con los valores máximos permisibles descritos en la Resolución 0631 de 2015, que aplicaban al contexto de la investigación como se muestra en la **Tabla 5**. En la sección de aguas residuales no domésticas (ARnD) para actividades productivas de agroindustria, se seleccionó la *producción de azúcar y derivados a partir de la caña de azúcar*, como referencia para comparar los parámetros que estuvieran contemplados.

Tabla 5. Parámetros aplicables contemplados en la Resolución 0631 de 2015

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>	<i>Producción de azúcar y derivados a partir de caña de azúcar</i>
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	900,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	200,00
Nitratos (N-NO ₃ -)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ -)	mg/L	Análisis y Reporte
Color Real	m-1	Análisis y Reporte

Fuente: Autores, 2019. Basado en la Resolución 0631 de 2015 del MADS

Plan de trabajo

En la **Tabla 6**, se encuentra el plan de trabajo, donde se describen las actividades realizadas y resultados esperados para cada objetivo específico; con el fin de dar cumplimiento al objetivo general.

Tabla 6. Plan de trabajo para el desarrollo del proyecto

Objetivo General		
Construir y poner en funcionamiento un reactor SBR de lodos activados a escala laboratorio, para el tratamiento de vinaza proveniente de un ingenio azucarero (Valle del Cauca, Colombia), con el fin de reducir su carga contaminante.		
Objetivos específicos	Actividades	Resultados esperados
Establecer el diseño del biorreactor a partir de revisión bibliográfica.	Revisión bibliográfica de documentos relacionados con el tema	Encontrar el documento pertinente para iniciar el diseño del sistema
	Establecer las dimensiones	Obtener los planos a escala
	Cotización de materiales y accesorios para la construcción	Tener un estimado del presupuesto de la construcción y accesorios
	Construcción de los prototipos a escala laboratorio	Prototipo de los biorreactores tamaño a escala
Evaluar el funcionamiento del reactor SBR de lodos activados a escala laboratorio que trata la vinaza.	Realización de pruebas hidráulicas	No hay fugas en los prototipos
	Puesta en marcha de los biorreactores	Correcto funcionamiento al conectar las bombas aireadoras
Determinar el porcentaje de disminución de toxicidad de los parámetros medidos contenidos en la vinaza.	Determinación de los parámetros físicos y químicos	Mejores resultados a medida que se toman las muestras
	Cálculo del porcentaje de remoción	Disminución de la carga contaminante en la vinaza
	Comparación de la calidad del residuos con normatividad	Los parámetros están dentro del rango de máximos permisibles

Fuente: Autores, 2019

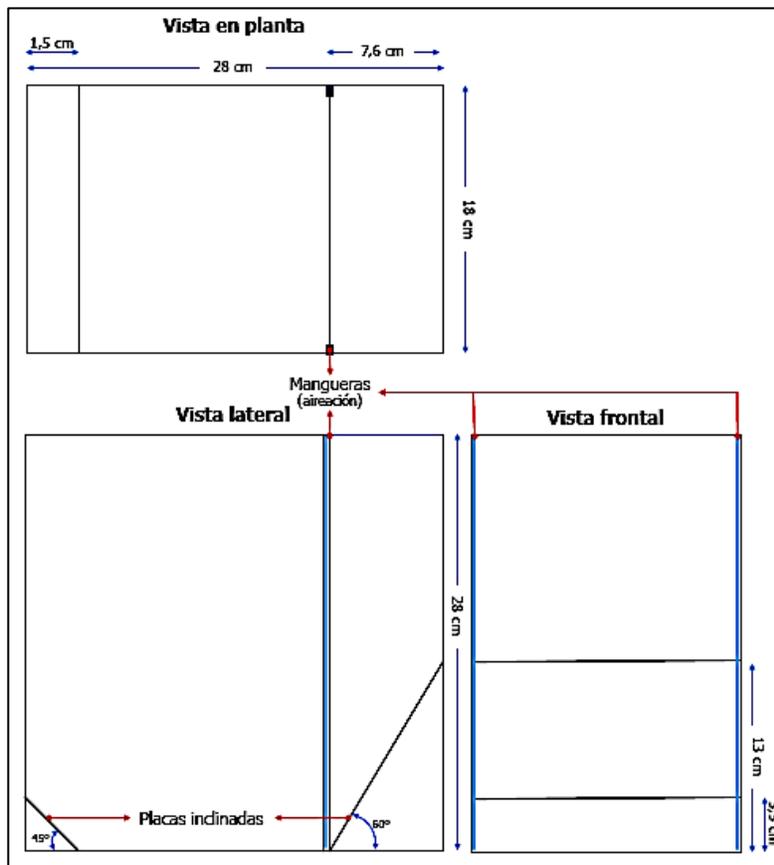
Resultados, discusión y análisis

Objetivo específico 1: Establecer el diseño del biorreactor a partir de revisión bibliográfica.

Los parámetros de diseño se establecieron a partir de la búsqueda en bases de datos y siguiendo los lineamientos del libro de Reynolds y Richards, *Unit operations and processes in environmental engineering* (1996). De esta manera, se construyeron dos biorreactores aerobios en acrílico con un grosor de 0,5 cm, uno para agua sintética y otro para el tratamiento de la vinaza.

Se obtuvieron las siguientes dimensiones a escala para cada reactor: 28 cm de profundidad, 28 cm de altura y 18 cm de ancho para un volumen total de 14 litros aproximadamente. Además, a 7,6 cm del borde derecho del biorreactor, en las placas laterales, se encontraban unas barras rectangulares de acrílico que iban hasta el fondo y sostenían las dos mangueras para que la aireación ocurriera en todo el sistema. Así mismo, las dos placas inclinadas situadas en la parte inferior, una a 45° y otra a 60°, contribuían a una mezcla completa y también para evitar la acumulación de los lodos en las esquinas y su fácil retiramiento. En la **Figura 4**, se muestra el plano del diseño con sus respectivas dimensiones, y en la **Figura 5** se muestra un reactor construido.

Figura 4. Planos del biorreactor



Fuente: Autores, 2018

Figura 5. Biorreactor en acrílico



Fuente: Autores, 2018

Tabla 7. Presupuesto general del proyecto

<i>Nombre del equipo</i>	<i>Justificación</i>	<i>Valor total equipos</i>
Aireadores	Oxigenación y medio aerobio del reactor	\$ 30.000
Mangueras	Permiten el flujo de la vinaza al reactor	\$ 6.000
Biorreactores en acrílico	Tecnología para tratar la vinaza	\$ 380.000
Computador	Revisión bibliográfica, investigación, realización del documento, cálculos.	\$ 444.000
WiFi	Conexión a internet	\$ 90.000
Vinaza	Envío desde Cali-Bogotá	\$ 80.000
Total		\$ 1'030.000

Fuente: Autores, 2018

La vinaza fue enviada desde el ingenio en Valle del Cauca, y se almacenó a temperatura ambiente mientras se ajustaba el montaje experimental del sistema (**Figura 6**).

Figura 6. Vinaza almacenada en las instalaciones del Ingenio



Fuente: Autores, 2018

Objetivo específico 2: Evaluar el funcionamiento del reactor basado en la tecnología SBR de lodos activados a escala laboratorio que trata la vinaza.

Este se realizó en el laboratorio de ingeniería ambiental investigación de la Universidad El Bosque (Bogotá), los equipos, materiales y reactivos fueron suministrados por la universidad.

Se rotularon los biorreactores volumétricamente con ayuda de una probeta y se realizaron pruebas hidráulicas para comprobar que no hubiese fuga alguna que pudiera perjudicar el correcto funcionamiento (**Figura 7**). Una vez se realizaron dichas pruebas se indicó la medida de volumen óptimo de trabajo y se procedió a la fase de llenado (**Figura 8**).

Figura 7. Rotulado volumétrico del biorreactores y pruebas hidráulicas



Fuente: Autores, 2018

Figura 8. Llenado de biorreactor para tratamiento de vinaza



Fuente: Autores, 2018

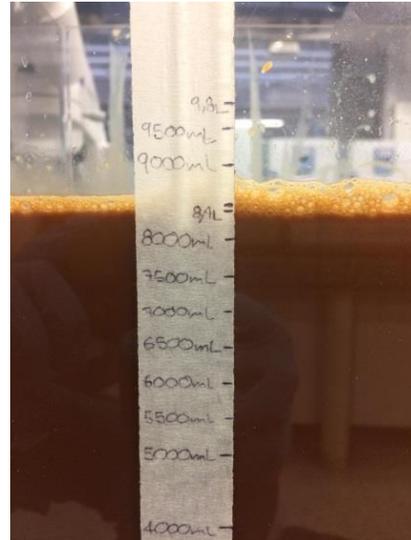
El cultivo mixto obtenido también se almacenó a temperatura ambiente, en la **Figura 9**, se muestra la medición del volumen de los microorganismos que se adicionaron al sistema y en la **Figura 10**, se indica la medida del volumen óptimo de trabajo para el biorreactor de la vinaza.

Figura 9. Medición del volumen de microorganismos del sistema ECOPAC®



Fuente: Autores, 2018

Figura 10. Volumen óptimo de trabajo para el biorreactor de la vinaza



Fuente: Autores, 2018

Después se realizó la adecuación del control con agua sintética, donde se le adicionó la misma cantidad correspondiente de microorganismos (**Figura 11**). Se tomó la primera muestra para la caracterización de los parámetros físicos y químicos y se realizó el montaje. Se introdujeron las mangueras en los biorreactores y se conectaron a los aireadores para iniciar la operación del sistema a temperatura ambiente (**Figura 12**).

Figura 11. Adición de microorganismos al agua sintética



Fuente: Autores, 2018

Figura 12. Montaje y puesta en marcha de ambos sistemas



Fuente: Autores, 2018

Objetivo específico 3: Determinar el porcentaje de remoción de los parámetros medidos en la vinaza para validar la aplicabilidad del sistema.

Durante el período experimental, se tomaron las muestras y se fueron realizando las pruebas correspondientes a cada parámetro para calcular la remoción de cada uno después del tratamiento, como se describe a continuación.

<i>Agua sintética</i>							
<i>Parámetro</i>	<i>Tiempo 1</i>	<i>Tiempo 2</i>	<i>Tiempo 3</i>	<i>Tiempo 4</i>	<i>Tiempo 5</i>	<i>Tiempo 6</i>	<i>Remoción</i>
pH	6,8	7,54	7,6	7,32	7,75	7,7	-
CE (µs/cm)	293	308	290	258	263	269	8,19 %
SDT (mg/L)	129	135	132	145	146	154	14,29 %
<i>Vinaza</i>							
<i>Parámetro</i>	<i>Tiempo 1</i>	<i>Tiempo 2</i>	<i>Tiempo 3</i>	<i>Tiempo 4</i>	<i>Tiempo 5</i>	<i>Tiempo 6</i>	<i>Remoción</i>
pH	3,86	3,76	3,8	3,77	3,77	3,81	-
CE (µs/cm)	7580	7560	7400	7130	7060	5770	23,88 %
SDT (mg/L)	3670	3650	3600	3520	3250	2860	22,07 %

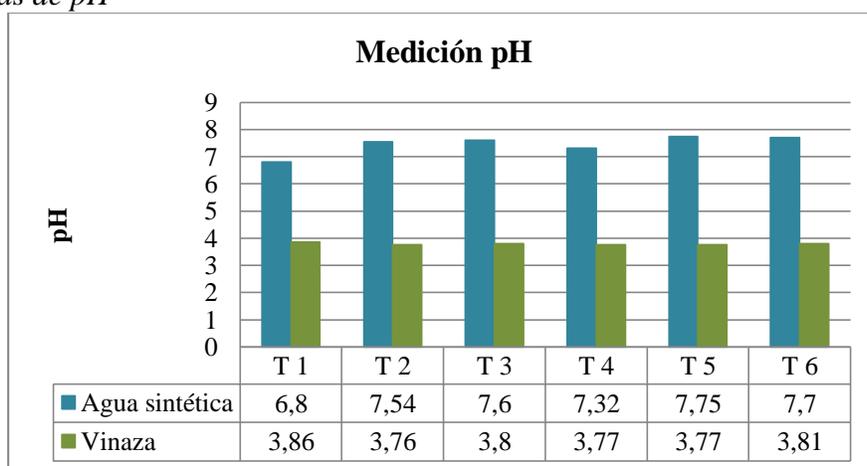
Tabla 8. Resultados de pH, CE, SDT medidos con multiparámetro

Fuente: Autores, 2019

pH

Como se evidencia en la **Figura 13**, se establece que el pH del agua sintética oscila entre ligeramente ácido y ligeramente alcalino y se encuentra en un rango de variación de 6,8-7,7 de la escala de pH (**Figura 14**). Realizando una comparación con el tratamiento de Varila y Díaz (2008), el pH se mantiene estable y neutro entre esos rangos. Obtuvo un rango de variación entre 6,8-7,75 (**Tabla 8**).

Figura 13. Gráficas de pH



Fuente: Autores, 2019

Figura 14. Escala de pH



Fuente: www.carbotecnia.info

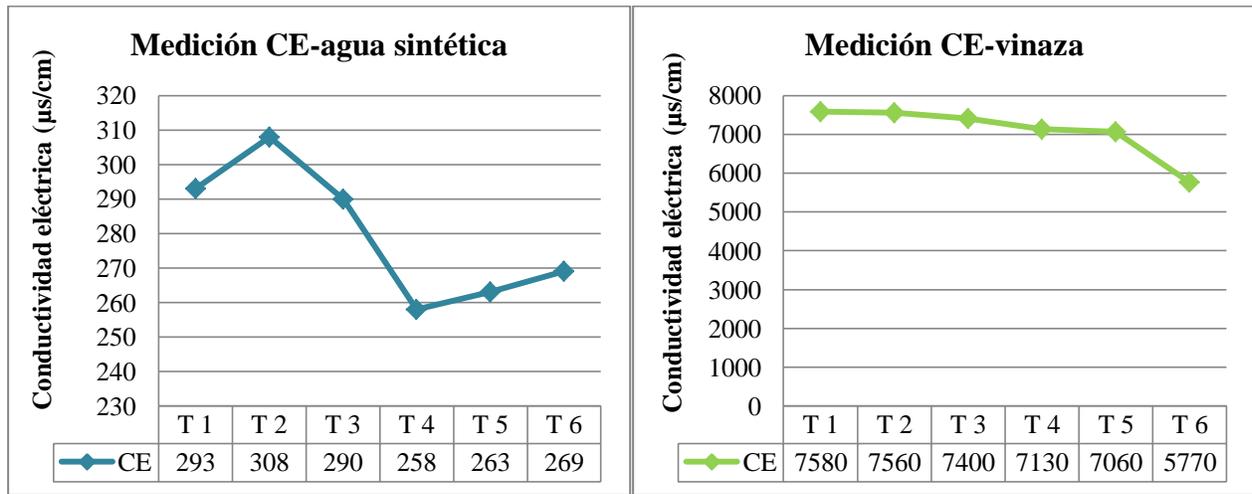
En cuanto a la vinaza, al final del tratamiento tuvo un valor de 3,81 y según la norma correspondiente (**Tabla 5**) este dato se encuentra por fuera del rango que debería ser entre 6 y 9, aproximadamente 2 unidades de pH por debajo del límite máximo permisible. Sin embargo, este residuo en particular tiene pH muy bajo como se encontró en estudios realizados por Aristizábal (2015), García y Rojas (2006), Lezcano y Mora (2011), Martínez, Jiménez y Rivera (2013), quienes informan que el pH de la vinaza se encuentra entre 3,5-5.

Mantiene un pH moderadamente ácido según la escala. Estuvo en un rango de variación entre 3,77 y 3,86 como se observa en la **Tabla 8**. La acidez en la vinaza, se le atribuye principalmente a su composición por materiales orgánicos, constituyentes vegetales como aminoácidos, proteínas, lípidos, ácidos diversos, enzimas, ácidos nucleicos, etc. (Molina & Quiñónez, 2012). De manera que, por la naturaleza que compone el residuo, este no varía en su pH.

Conductividad eléctrica CE

La carga de sales disueltas, expresada en valores de conductividad eléctrica en la vinaza pasó de ser 7580 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 5770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ver **Tabla 8**). Este valor fue mucho menor en este caso comparándolo con diferentes estudios en Latinoamérica como en Argentina en el cual la conductividad eléctrica de la vinaza de esta zona era de 28600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o con el valor que referenciado en México de 19500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Moraña, Gil, Álvarez & Salusso, 2017). En Colombia, según un estudio acerca de las posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura hecho por García y Rojas (2006) la caracterización de esta arrojó que la conductividad eléctrica era de 17000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando para este caso que, después del tratamiento empleado en el biorreactor se logró obtener un valor considerable ya que se encuentra por debajo del valor referencia en la zona de estudio.

Figura 15. Gráficas de conductividad eléctrica



Fuente: Autores, 2019

Como se muestra en la **Tabla 8**, la conductividad eléctrica tuvo una disminución con un porcentaje de remoción del 8,19% para el agua sintética y del 23,88% para la vinaza, arrojando un resultado significativo para la matriz objeto de estudio. Esta reducción en este parámetro es importante pues entre mayor sea la carga de sales disueltas por parte de la vinaza y en caso de que este residuo fuera dispuesto o vertido en suelos aledaños podría presentar una alta salinidad afectando la productividad de estos (Alfaro & Ocampo, 2012).

Sólidos disueltos totales SDT

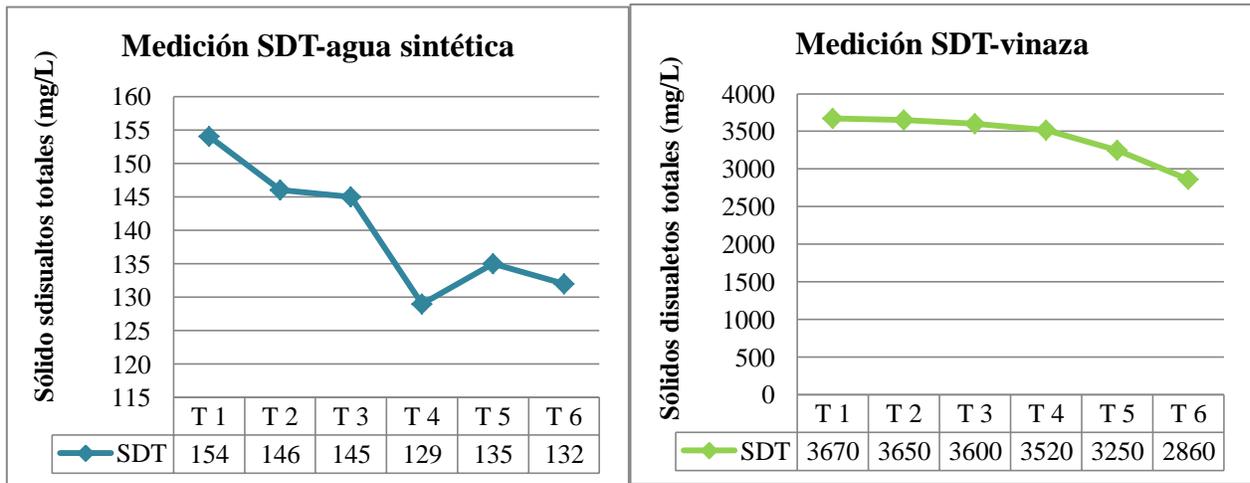
En la **Tabla 8**, se evidencia una reducción de SDT del 14,29% para agua sintética, y de 22,07% en la vinaza. A medida que avanzaba la fase experimental, se pudo evidenciar en el agua sintética la formación de lodos en el lecho del biorreactor (**Figura 16**).

Figura 16. Lodos sedimentados en el agua sintética



Fuente: Autores, 2018

Figura 17. Gráficas de sólidos disueltos totales



Fuente: Autores, 2019

No se tiene registro fotográfico de la formación de sólidos en el biorreactor que contenía la vinaza, puesto que la muestra se encontraba muy turbia y no podía observarse con facilidad el comportamiento del residuo durante el tratamiento. Sin embargo, teniendo en cuenta el comportamiento de la vinaza en la gráfica (**Figura 17**), se asume que la formación de sedimentos fue mayor, gracias a la disminución de sólidos disueltos totales tal como se pudo identificar al finalizar la fase experimental (**Figura 18**).

Figura 18. Lodos activados al final del tratamiento.



Fuente: Autores, 2018

La formación del sedimento puede deberse a la coagulación de partículas en lodos activados por eliminación de la materia orgánica con ayuda de los microorganismos del reactor ECOPAC® que

fueron añadidos. Tal como se explica en el Manual Técnico sobre Tecnologías Biológicas Aerobias Aplicadas al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (Buitron, Reino & Carrera, 2016), la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica son llevadas a cabo por los microorganismos que actúan, formando lodos y disminuyendo la cantidad de sólidos disueltos en el agua tratada.

Las condiciones de la vinaza aportaron una cantidad importante de materia orgánica disponible para el cultivo del sistema ECOPAC® combinando la tecnología de los sistemas aerobios de lodos activados y los sistemas de lecho fijo, proporcionando un sistema tratamiento eficiente de aguas residuales y para el caso del estudio ya que permite una excelente transferencia de oxígeno a los microorganismos responsables de la eliminación de la materia orgánica.

Sólidos totales secados STS y sólidos suspendidos totales SST

Los resultados del procedimiento de determinación de sólidos, realizados a partir de las técnicas del IDEAM, se evidencian en la **Tabla 9**. Es importante tener en cuenta que los resultados de la tabla corresponden a la vinaza diluida en factor 1:1000 para facilitar la técnica de determinación de sólidos y realizar un análisis más certero.

Tabla 9. Determinación de sólidos totales secados y sólidos suspendidos totales

<i>Agua Sintética</i>		
<i>Tiempo</i>	<i>STS (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>
1	10290,0	4637,8
2	7140,0	2867,8
3	6220,0	3,664,4
4	5500,0	2802,2
5	4210,0	2477,8
6	2730,0	2100,0
<i>Remoción</i>	73,47%	54,72%
<i>Vinaza</i>		
<i>Tiempo</i>	<i>STS (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>
1	8930,0	6885,6
2	7160,0	4895,6
3	3690,0	3594,4
4	3480,0	3201,1
5	3220,0	3136,7
6	2100,0	1898,9
<i>Remoción</i>	76,48%	72,42%

Fuente: Autores, 2019

Se obtuvieron porcentajes de remoción de STS del 73,47% para agua sintética, 76,48% en el caso de la vinaza, y para los SST fue de 54,72% para agua sintética y 72,42% en vinaza. Una de las principales razones es que la naturaleza del tratamiento SBR, donde se integran los procesos de reacción, aireación y clarificación, permitió eliminar gran porcentaje de sólidos suspendidos y contenidos en la muestra con ayuda de la acción metabólica de los microorganismos (Guzmán & Guerrero, 1998). La materia orgánica transformada en lodos activos no se eliminó, pero fue sedimentada en el lecho del reactor (**Figura 18**).

Figura 19. Vista en planta de los reactores antes de iniciar la operación



Fuente: Autores, 2018

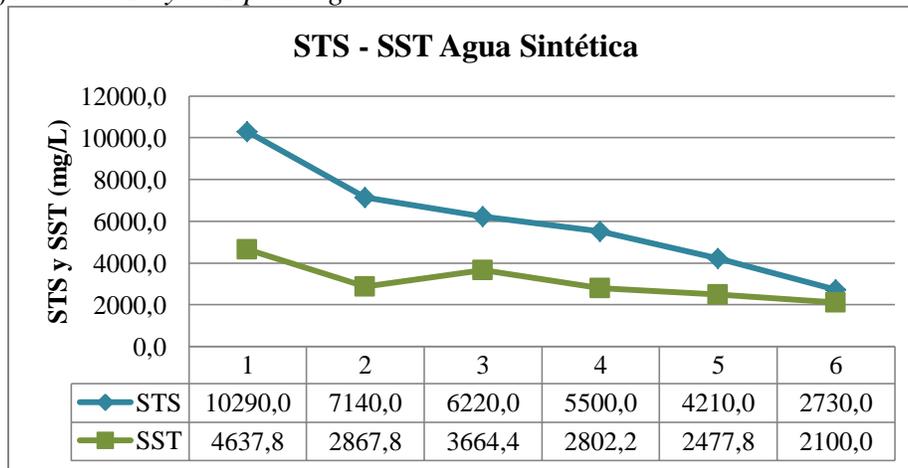
Figura 20. Vista en planta de los reactores el último día del tratamiento



Fuente: Autores, 2018

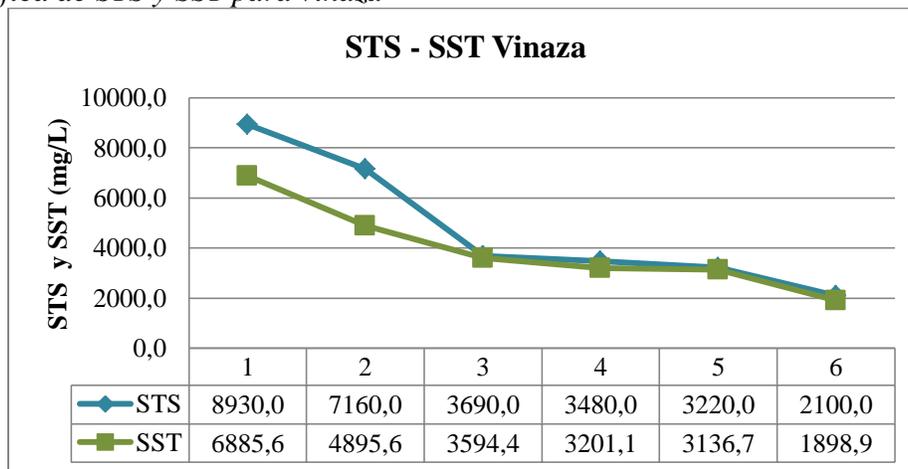
En las **Figuras 19 y 20** se pueden observar las etapas inicial y final de la fase de operación. El tratamiento en el agua sintética permite ver con mayor claridad la sedimentación de los sólidos, y por el comportamiento de las gráficas se infiere que en la vinaza ocurrió de manera similar (**Figura 21-22**).

Figura 21. Gráficas de STS y SST para agua sintética



Fuente: Autores, 2019

Figura 22. Gráfica de STS y SST para vinaza



Fuente: Autores, 2019

Las gráficas presentan el comportamiento de los sólidos secados totales y sólidos suspendidos totales en unidades de gramo por litro, para cada uno de los tiempos de muestra a lo largo del tratamiento. Si bien, el período experimental no fue tan prolongado, se evidencia una tendencia en la disminución de los sólidos presentes de cada una de las muestras.

En un estudio realizado por Zúñiga y Gandini en 2013, quienes hicieron una caracterización de tres muestras de vinaza en el Valle del Cauca, se encontró los valores oscilaban entre 7405-8460 mg/L (sólidos totales) y 3840-5035 mg/L (sólidos suspendidos). Se puede expresar que la vinaza inicialmente presentaba un alto contenido de sólidos y a medida que avanzaba el período de tratamiento estos disminuyeron progresivamente gracias a la actividad microbiológica y la aireación, y en promedio se encuentran en los rangos de esta caracterización.

Por otro lado, el valor de SST contemplado en la norma (**Tabla 5**) indica su límite máximo permitido es de 200 mg/L, lo que demuestra que la vinaza tratada se encontraría por fuera del rango. Por tal

motivo, se tomó como referencia el estudio descrito anteriormente: Zúñiga y Gandini (2013), con el fin de justificar que este residuo específicamente contiene una gran cantidad de material sólido contenido.

Nitratos y nitritos

En la **Tabla 10**, tanto para el agua sintética como para la vinaza se logró la disminución de nitritos y nitratos con porcentajes de remoción del 100%. Cabe resaltar que este porcentaje no es exacto debido a que la técnica de medición de este parámetro no permite la detección de las concentraciones puntuales, pues la tarjeta colorimétrica del Kit (**Figuras 23 y 24**) mostraba valores específicos para colores sujetos a la percepción de los autores. Las últimas mediciones realizadas arrojaban un color que se acercaba más hacia el valor de 0,0 mg/L, por lo tanto se estima que experimentalmente la reducción fue total pero es un valor aproximado.

Tabla 10. Determinación de nitritos y nitratos

<i>Agua Sintética</i>								
<i>Parámetro</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>Tiempo 1</i>	<i>Tiempo 2</i>	<i>Tiempo 3</i>	<i>Tiempo 4</i>	<i>Tiempo 5</i>	<i>Tiempo 6</i>	<i>Remoción</i>
Nitritos	NO ₂ ⁻	2	2	2	0,1	0,1	0	100 %
	NO ₂ -N	0,6	0,6	0,6	0,03	0,03	0	100 %
Nitratos	NO ₃ ⁻	25	25	25	10	10	0,1	99,6 %
	NO ₃ -N	5,6	5,6	5,6	2,3	2,3	0,03	99,46 %

<i>Vinaza</i>								
<i>Parámetro</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>Tiempo 1</i>	<i>Tiempo 2</i>	<i>Tiempo 3</i>	<i>Tiempo 4</i>	<i>Tiempo 5</i>	<i>Tiempo 6</i>	<i>Remoción</i>
Nitritos	NO ₂ ⁻	10	10	10	10	0	0	100 %
	NO ₂ -N	3	3	3	3	0	0	100 %
Nitratos	NO ₃ ⁻	5000	5000	1000	1000	1000	0	100 %
	NO ₃ -N	1100	1100	230	230	230	0	100 %

Fuente: Autores, 2019

Figura 23. Kits de nitritos de Mark con tarjeta colorimétrica



Fuente: Autores, 2018

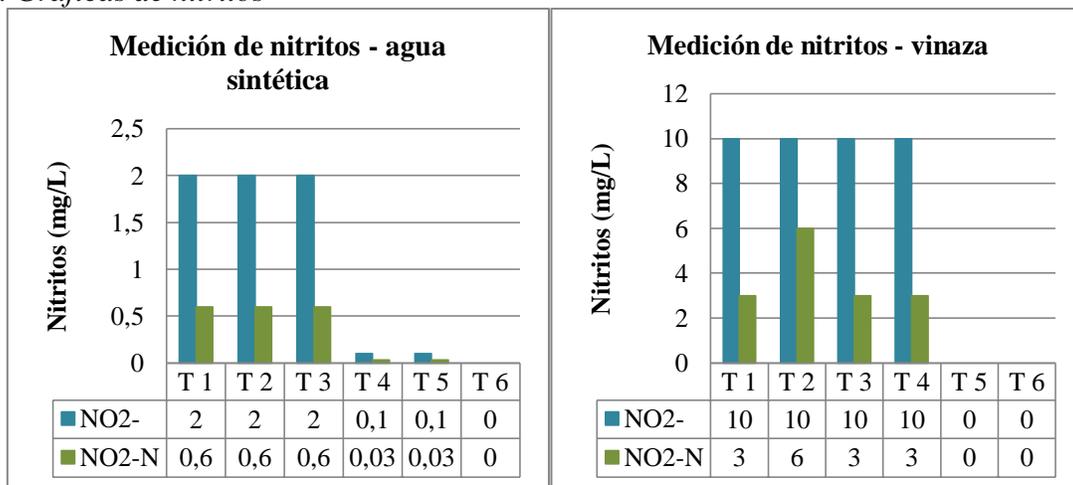
Figura 24. Kit nitratos de Merk con tarjeta colorimétrica



Fuente: Autores, 2018

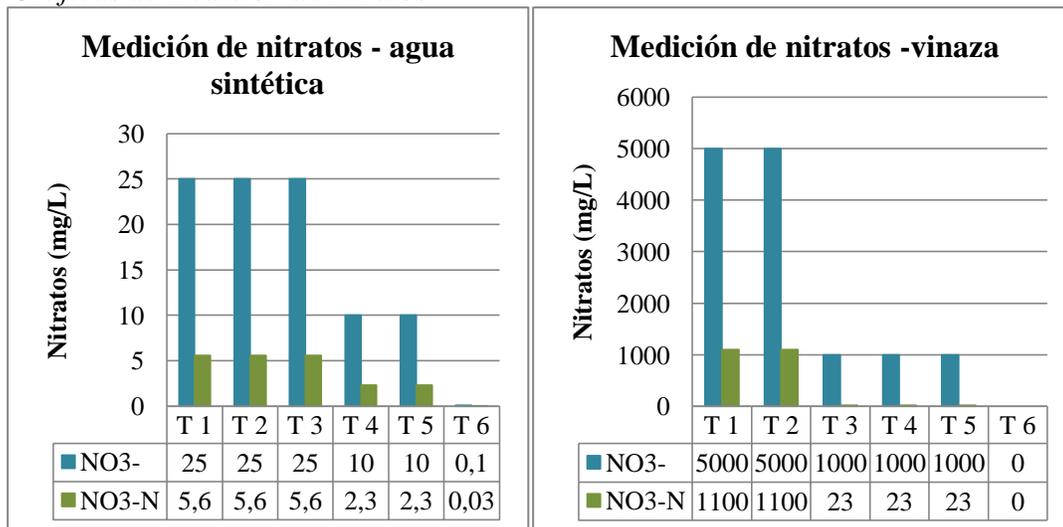
En cuanto a la eliminación biológica de nitrógeno, se hace referencia a que las bacterias nitrificantes son aerobias. Destacando que en cualquier sistema de depuración biológica existe siempre una eliminación de nitrógeno por asimilación, es decir, para la formación de biomasa (Arnáiz, Isac & Lebrato, 2000). Además, al contar con una fuente de aireación constante, en un sistema aerobio como este, se aprovecha la capacidad que tienen los microorganismos de asimilar materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo disueltos para su propio crecimiento, en presencia de oxígeno, que actuará como aceptor de electrones en el proceso de oxidación de la materia orgánica (Condorchem Envitech, s.f.).

Figura 25. Gráficas de nitritos



Fuente, Autores, 2019

Figura 26. Gráficas de medición de nitratos



Fuente: Autores, 2019

Esto hace que la reducción de este parámetro sea significativa pues se minimiza el riesgo de posibles consecuencias generadas por la presencia de compuestos de N en el sistema como: el aumento de la

acidez, el desarrollo de eutrofización y el aumento de las concentraciones hasta niveles tóxicos; en aguas superficiales, subterráneas y fuentes de agua para consumo humano. Teniendo en cuenta que los nitratos son el producto final de la nitrificación, este compuesto puede llegar a ser nocivo para las personas, pero relativamente inofensivo para otros organismos acuáticos (Cárdenas & Sánchez, 2013).

En la Resolución 631 de 2015, se tienen en cuenta los nitritos y nitratos para las actividades agroindustriales de producción de azúcar y derivados a partir de caña de azúcar. Sin embargo, no se encuentra establecido un rango o valor máximo permisible y se debe indicar según análisis y reporte del estudio realizado.

Turbiedad y color

La turbiedad y el color son parámetros que comparten características en el fundamento de sus técnicas e instrumentos, de modo que los resultados se asemejan entre sí, como se puede comparar entre las **Tablas 11 y 12**. Debido a la naturaleza del residuo y su alto contenido de material disuelto, este no permite el paso de la luz a través de sí. Por lo tanto, fue necesario realizar una dilución de 1:1000 a la vinaza para que ambos equipos (turbidímetro y fotómetro) reconocieran las muestras. El resultado que se muestra corresponde a la corrección de la dilución.

Tabla 11. Determinación de turbiedad

<i>Turbiedad (NTU)</i>		
<i>Tiempo</i>	<i>Agua Sintética</i>	<i>Vinaza</i>
1	155	19600
2	36,5	25000
3	13,1	18200
4	13,4	17900
5	1,73	16000
6	1,98	15900
Remoción	98,72%	18,88%

Fuente: Autores, 2019

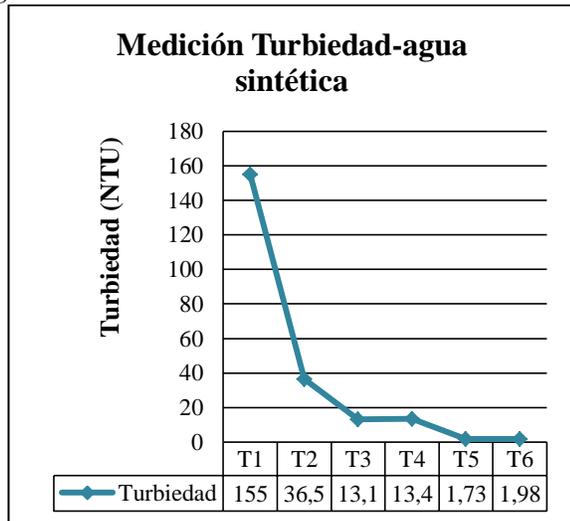
Tabla 12. Determinación de color

<i>Color (PCU)</i>		
<i>Tiempo</i>	<i>Agua Sintética</i>	<i>Vinaza</i>
1	850	341000
2	296	416000
3	123	325000
4	130	321000
5	2	274000
6	4	277000
Remoción	99,53%	18,77%

Fuente: Autores, 2019

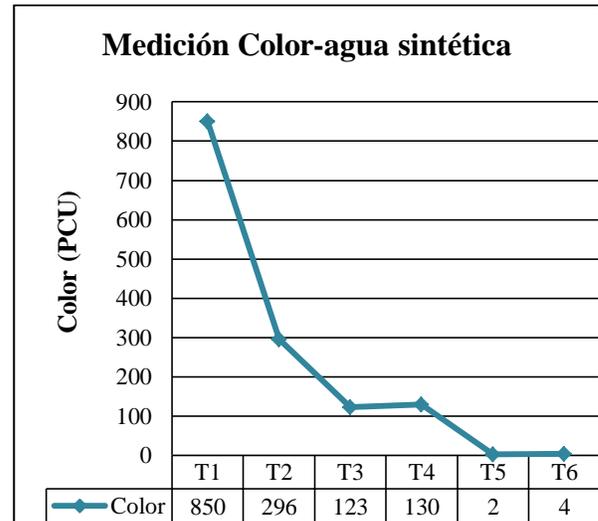
En la **Tabla 10**, se presentan las mediciones del Turbidímetro. El tratamiento permitió un porcentaje de remoción del 98,72% para el agua sintética, que resultó ser bastante significativo en comparación con el de la vinaza, 18,88%. Los porcentajes fueron muy similares para los resultados obtenidos en la prueba de color (**Tabla 11**), donde se obtuvo 99,53% de remoción de color para agua sintética y 18,77% en la vinaza diluida.

Figura 27. Gráfica de turbiedad (NTU) para agua sintética



Fuente: Autores, 2019

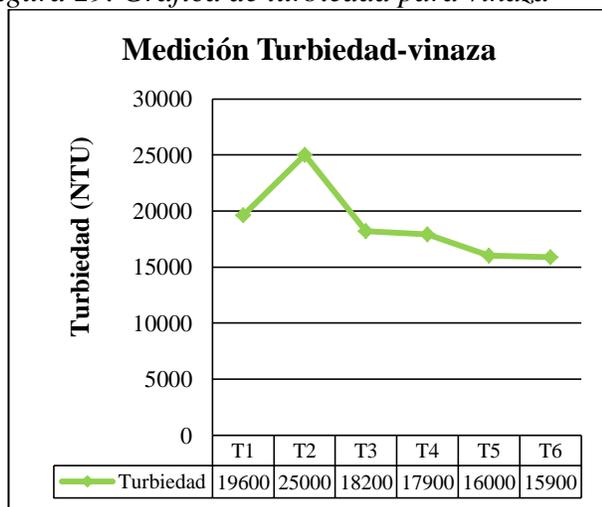
Figura 28. Gráfica de color (PCU) para agua sintética



Fuente: Autores, 2019

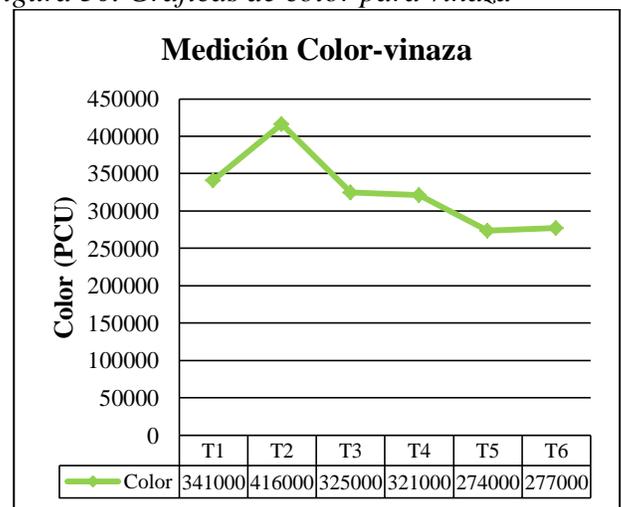
La turbiedad se asocia a la presencia de sólidos e indica el grado de dispersión de un haz de luz aplicado a una muestra. Sirve como una medida de la calidad en relación con la materia suspendida coloidal y residual (Trujillo, *et al.*, 2014). Para el caso del agua sintética, se puede relacionar la disminución de la turbiedad a la coagulación de los residuos coloidales en el lecho del reactor, como sucedió en las pruebas de sólidos; ya que a medida que avanzaba a fase experimental, el biorreactor con el control se encontraba cada vez menos turbio (ver **Figura 20**). Entre el tiempo de muestreo 1 y 2 (**Figura 27-28**) se evidencia una fluctuación abrupta en ambos parámetros.

Figura 29. Gráfica de turbiedad para vinaza



Fuente: Autores, 2019

Figura 30. Gráficas de color para vinaza



Fuente: Autores, 2019

Por otro lado, el tratamiento en la vinaza a pesar de no ser igual de eficiente que en control, representó una disminución de turbiedad y color del 18% con tendencia a continuar disminuyendo gradualmente (**Figura 29-30**). Una de las razones puede deberse a que las partículas coloidales y materia orgánica presentes, impiden el paso de la radiación solar (Martínez, Jiménez & Rivera, 2013), y absorben la energía haciendo que la vinaza aumente su temperatura y disminuya la cantidad de oxígeno, el cual se disuelve mejor en sustancias líquidas de menor temperatura (Lenntech, 2019). Al someter la vinaza a un tratamiento de aireación constante, aumenta el oxígeno disponible y va disminuyendo la turbiedad y el color.

Para el caso del color, que se tiene en cuenta en la Resolución 631 de 2015 en las actividades agroindustriales de producción de azúcar y derivados a partir de caña de azúcar; este no cuenta con un rango o valor máximo permisible y se debe indicar según análisis y reporte del estudio realizado.

Oxígeno Disuelto

El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos o, en este caso, de difusores que también sirven para mantener el líquido completamente mezclado (Peña, 2012). El oxígeno fue suministrado, a través de las bombas aireadoras, desde el momento en que se pusieron en funcionamiento los biorreactores. No se contaba con un equipo que midiera este parámetro in situ, por lo que fue necesario tomar la muestra y luego hacer la prueba por medio del Kit, lo cual pudo haber tenido influencia en los resultados haciendo que el dato no fuera totalmente verídico.

Tabla 13. Determinación de oxígeno disuelto

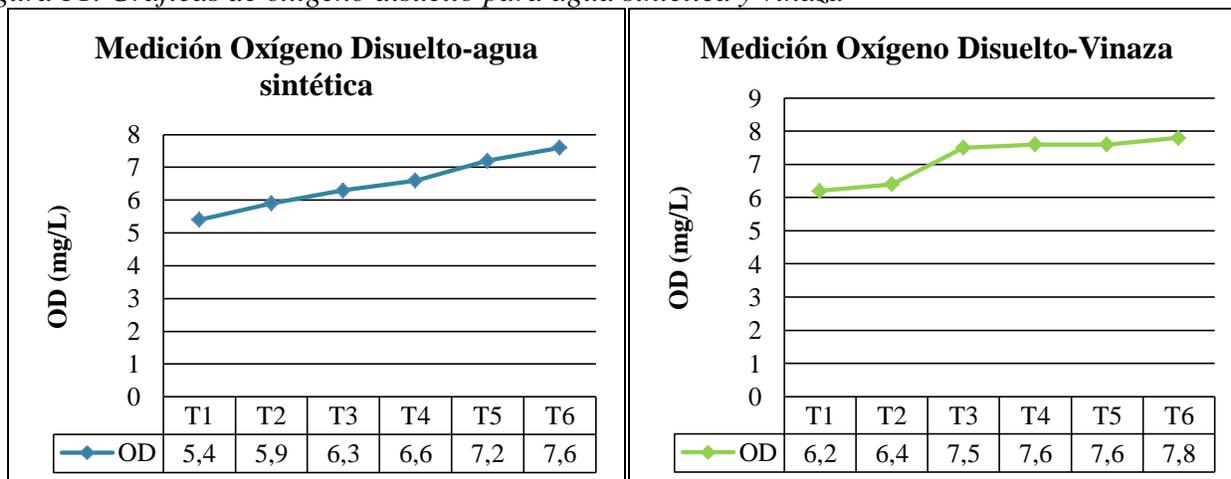
<i>Oxígeno Disuelto (mg/L)</i>		
<i>Tiempo</i>	<i>Agua sintética</i>	<i>Vinaza</i>
1	5,4	6,2
2	5,9	6,4
3	6,3	7,5
4	6,6	7,6
5	7,2	7,6
6	7,6	7,8
<i>Aumento</i>	40,74%	25,81%

Fuente: Autores, 2019

Como se muestra en la **Tabla 13** el OD para el agua sintética comenzó en 5,4 mg/L y terminó en 7,6 mg/L con un aumento de 40,74% y para la vinaza comenzó en 6,2 mg/L y terminó en 7,8 mg/L, aumentando 25,81%. Eso indica que a medida que avanzaba el tiempo en la fase experimental el oxígeno disuelto tendía a aumentar (**Figura 31**), haciendo que al final del tratamiento tuviera un resultado similar en ambos reactores.

Este parámetro es de gran importancia, pues los microorganismos viven y son mantenidos en suspensión por las burbujas de aire dentro del tanque, y adicionalmente los sistemas de lodos activados utilizan el oxígeno para realizar el proceso oxidación de la materia orgánica (Peña, 2012).

Figura 31. Gráficas de oxígeno disuelto para agua sintética y vinaza



Fuente: Autores, 2019

DQO

Según Peña (2012) la DQO corresponde en parte al sustrato o alimento de las bacterias, en este caso del cultivo del reactor ECOPAC®200, y se relaciona con el suministro y la disponibilidad del oxígeno en el sistema que los microorganismos necesitan para vivir y realizar el proceso de oxidación de la materia orgánica, de modo que este tiene a aumentar (**Figura 30**) hasta estabilizarse mientras la DQO disminuye.

Tabla 14. Determinación de DQO

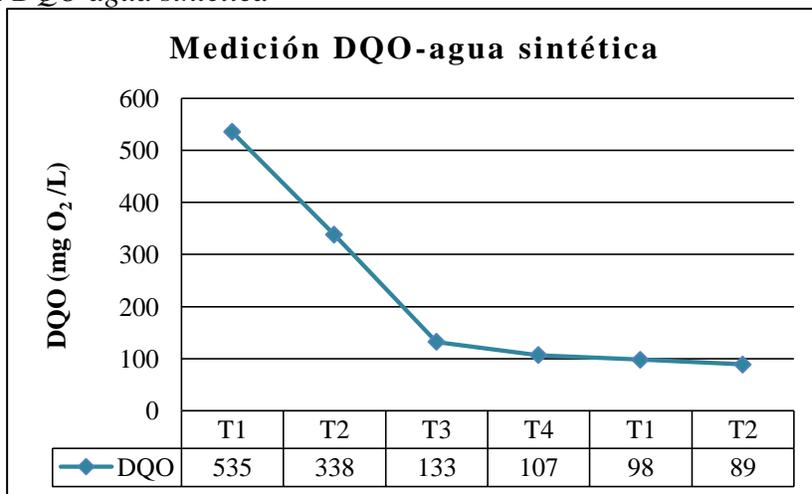
Tiempo	DQO (mg O ₂ /L)	
	Agua sintética	Vinaza
1	535	594000
2	338	584000
3	133	587000
4	107	563500
5	98	561000
6	89	525000
Remoción	83,36%	11,62%

Fuente: Autores, 2019

En los dos biorreactores se obtuvo una disminución de la DQO al final del tratamiento, pero comparando el resultado de la última medición para la vinaza con la norma (**Tabla 5**) correspondiente se encuentra por fuera del límite máximo permisible (900 mg O₂/L) incumpliendo con la legislación. Pero si se compara con un estudio realizado por García y Rojas (2006) la vinaza del ingenio Sucromiles ubicado en Palmira (Valle del Cauca, Colombia) tenía una DQO de 590000 mg/L indicando que antes del tratamiento estaba por encima de este valor (594000 mg O₂/L) y después del tratamiento estaba por

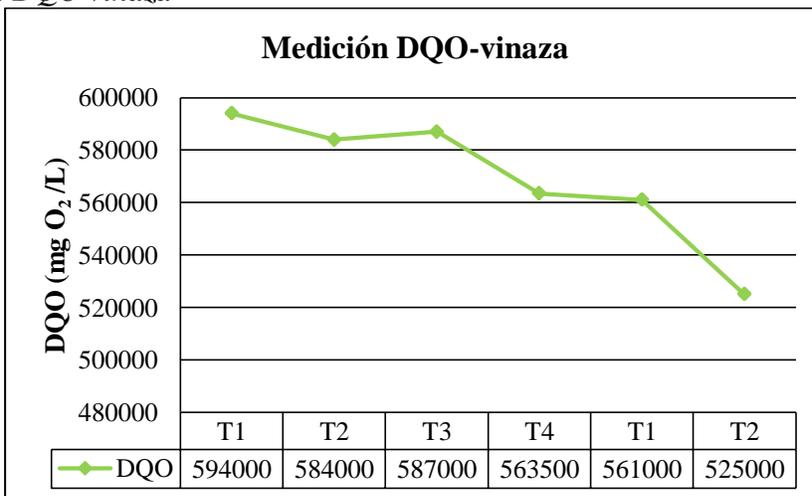
debajo del valor en referencia (525000 mg O₂/L). Estos valores elevados son una característica de este residuo industrial y pesar de ello, es evidente el correcto funcionamiento del sistema pues se obtuvo la disminución de la DQO tanto para el agua sintética como para la vinaza, con remociones de 83,36% y 11,62% respectivamente (**Tabla 14**).

Figura 32. Medición DQO agua sintética



Fuente: Autores, 2019

Figura 33. Medición DQO vinaza



Fuente: Autores, 2019

En las mediciones realizadas la concentración bajó en ambos casos excepto en el tiempo 3 (T3) para la vinaza (**Figura 33**). Esta remoción puede ser explicada teniendo en cuenta el fenómeno de biosorción, característico de los procesos de lodos activados que consiste en la capacidad que poseen los microorganismos, que se encuentran en un medio aerobio, de remover el alimento (materia orgánica) por absorción y adsorción (Delgado, Rennola & Lugo, 2006).

Conclusiones

Se seleccionó un sistema abierto, de acrílico y con placas inclinadas para facilitar la difusión del oxígeno y la sedimentación de los lodos en el biorreactor. Sus características de diseño permitieron que el control, el monitoreo, la toma de muestras y la medición de parámetros in situ y ex situ, se llevara a cabo de manera más sencilla para su posterior análisis. Además, se evidenció que la etapa de reacción y la etapa de sedimentación sucedieron simultáneamente.

A pesar de que el ciclo operacional de un reactor SBR opera en un tiempo máximo de 24 horas, al momento de realizar el primer muestreo no se obtuvieron cambios significativos y por ello se extendió el periodo de operación del sistema. Se pudo evidenciar el correcto funcionamiento del sistema con el control y con el sustrato evaluado a partir de la remoción en los parámetros. No obstante, no se obtuvieron resultados representativos en la vinaza que demostraran que un reactor basado en la tecnología SBR permitiera el tratamiento de este residuo, pues su elevado contenido de materia orgánica hace que la tecnología no sea aplicable en este caso.

Aunque el sistema mostró una leve remoción en los parámetros medidos y el aumento del oxígeno disuelto, es importante contemplar en futuras investigaciones la posibilidad de estabilizar el pH con un tratamiento químico previo y controlar la temperatura de manera que se proporcionen las condiciones óptimas para realizar una etapa de aclimatación de microorganismos y así poder obtener un registro de la curva de crecimiento en relación con el consumo de la carga orgánica, en términos de DBO y DQO. Adicionalmente, sería importante realizar una caracterización de los lodos al final del tratamiento para obtener resultados más significativos que incluyan el aprovechamiento posterior al tratamiento.

Fue posible combinar conocimientos basados en experiencias de diferentes autores en cuanto a una tecnología como los reactores aerobios de lodos activados de tipo SBR y el tratamiento de un residuo industrial de características complejas como lo es la vinaza, obteniendo una metodología significativa que consigue ampliar la información en el contexto colombiano en cuanto a la salud ambiental y el compromiso industrial con el ambiente, resolviendo problemas relacionados con la matriz problema, que puedan ser aplicables a mayor escala y ser de utilidad tanto para los ingenios azucareros como para la academia científica en posteriores investigaciones.

Recomendaciones

Teniendo en cuenta que el contenido de materia orgánica, sólidos totales, nutrientes y cualquier otro tipo de sustancia que intervenga en la calidad de la vinaza puede variar de acuerdo con el tipo de caña de azúcar utilizada, las condiciones climáticas y la tecnología de producción, no se puede establecer una única tecnología para el tratamiento de este residuo agroindustrial.

Se sugiere realizar un análisis dimensional en la etapa de diseño del biorreactor, para desarrollar un prototipo que permita simular las condiciones reales del lugar de almacenamiento de la vinaza en el ingenio.

Por otro lado, se recomienda utilizar un sistema biológico que integre procesos aerobios y anóxicos para que sucedan las fases de nitrificación y de desnitrificación correspondientes para lograr una remoción elevada de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, principalmente, con el fin establecer una tecnología que proporcione un tratamiento efectivo y demuestre su viabilidad.

Con el fin de darle un mayor alcance a la investigación, se sugiere medir gran parte de los parámetros establecidos en la legislación aplicable; además que sea realizada con equipos adecuados y técnicas sensibles para obtener un estado más detallado de la vinaza.

Finalmente, se recomienda continuar con las investigaciones referentes a este residuo para identificar las técnicas más adecuadas que se adapten a las condiciones según la caracterización de cada vinaza y comprender la inviabilidad de estandarizar un proceso a un residuo complejo por la variabilidad de su origen.

Bibliografía

- Alfaro, R. & Ocampo, R. (2012). Cambios físico-químicos provocados por la vinaza en un suelo vertisol en Costa Rica., Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA- LAICA Costa Rica).
- Aristizábal, C. (2015). Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar. *USB*, 6(2).
- Arnáiz, C., Isac, L. y Lebrato, J. (2000). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. Universidad de Sevilla.
- Asocaña. (2019). *El Sector Azucarero Colombiano en la Actualidad*. Sector Industrial de la Caña. Recuperado el 25 de marzo de 2019, de Asocaña: <http://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>.
- Antón, A., Lizaso, J. (2001). *Nitritos, nitratos y nitrosaminas*. Fundación Ibérica para la Seguridad Alimentaria. Madrid, España.
- Ausecha, S. & Vera, M. (2016). Optimización en el proceso de degradación de vinaza a partir de un cultivo mixto entre *komagataeibacter kakiaceti* GM5 y *trametes versicolor* DSM 3086. Universidad El Bosque.
- Bonsai Menorca. (2019). *Parámetros de Calidad de las Aguas de Riego*. <http://www.bonsaimenorca.com/articulos/articulos-tecnicos/parametros-de-calidad-de-las-aguas-de-riego/#Color>.
- Buitrón, G., Reino, C. & Carrera, J. (s.f.). Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales. Ciencia y tecnología para el desarrollo –CYTED–.
- Cárdenas, G. & Sánchez, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Revista Universidad y Salud*. Vol. 15(1) p. 72 – 88.
- Carrasquero, S., Rodríguez, M., Bernal, J. & Díaz, A. (2017). Eficiencia de un reactor biológico secuencias en el tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos cárnicos. Universidad Militar Nueva Granada. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* Vol. 14 (1) 2018, 1-11. Universidad Militar Nueva Granada.
- Cenicaña. (2014). *Glosario y Tesauro de la Agroindustria de la Caña de Azúcar de Colombia*.
- Charpentier, J. (2014). *Tratamiento de Aguas Residuales con Lodos Activados*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Cuaderno tecnológico.

- Condorchem Envitech (s.f.). Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Obtenido de: <https://blog.condorchem.com/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/>.
- Congreso de Colombia. (1979). Ley 9 de 1979. *Diario Oficial 35193 de febrero 5 de 1979*.
- Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. *Diario Oficial 41146 de diciembre 22 de 1993*.
- Consejo Superior de la Judicatura. (2016). Constitución Política de 1991.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (9 de Julio de 2014). *Proyectos Vinaza- CVC*. Recuperado el 11 de marzo de 2018, de <https://www.cvc.gov.co/tematicas/recurso-hidrico/proyectos/proyecto-vinazas>.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2012). *Flora y Fauna del Valle del Cauca*. Recuperado el 16 de mayo de 2018, de <https://www.cvc.gov.co/tematicas/biodiversidad/especies/flora>.
- Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*.
- Delgado, J., Rennola, L., & Lugo, S. (2006). Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales por lodos activados y su puesta en marcha para tratar vinazas de una destilería. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 27(3), 145-151.
- Domínguez, Y. S. (2007). El análisis de información y las investigaciones cuantitativa y cualitativa. *Revista Cubana de Salud Pública*, 33.
- Erijman, L., Figuerola, E., Guerrero, L., & Ayarza, J. (2011). Impacto de los recientes avances en el análisis de comunidades microbianas sobre el control del proceso de tratamiento de efluentes. *Revista Argentina de Microbiología*, 43(2), 127-135.
- Farrás, Q. (2017). Diseño de un reactor biológico secuenciado (Q A.R= 9000 m³/d) para reducir la producción de fangos mediante la aplicación de un desacoplador metabólico. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- García, Á., & Rojas, C. (2006). *Posibilidades de uso de la Vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos*. Nota Técnica Técnicaña, 3 – 13.
- Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, 81 (184), 158-163.
- Gutiérrez, N., Valencia, E., & Aragón, R. (2014). Eficiencia de remoción de DBO₅ y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arabica*). *Colombia Forestal* 17 (2). 151-159.

- Guzmán, K., & Guerrero, L. (1998). Co-tratamiento aerobio de aguas residuales industriales y domésticas. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98) (pp. 1-16). APIS.
- ICONTEC. (2004). Norma Técnica Colombiana - NTC-ISO 5667-3. Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras.
- IDEAM. (2004). *Oxígeno disuelto*. Recuperado el 17 de marzo de 2019, de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Ox%C3%ADgeno+Disuelto+M%C3%A9todo+Winkler.pdf/e2c95674-b399-4f85-b19e-a3a19b801dbf>.
- IDEAM. (2006). *Conductividad eléctrica*. Recuperado el 3 de marzo de 2019, de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>.
- IDEAM. (2007). *DQO*. Recuperado el 10 de marzo de 2018, de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno.pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>.
- IDEAM. (2007). *pH en agua por electrometría*. Recuperado el 12 de marzo de 2018, de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/pH+en+agua+por+Electrometr%C3%ADa.pdf/ec53b64e-91eb-44c1-befe-41fcfccdff1>.
- IDEAM. (2007). *Sólidos suspendidos totales*. Recuperado el 3 de marzo de 2019, de IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>.
- IDEAM. (2007). *Sólidos totales secados*. Recuperado el 3 de marzo de 2019, de IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103+-+105%C2%BAC.pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935olor>.
- IDEAM. (2007). *Turbiedad*. Recuperado el 3 de marzo de 2019, de IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Turbiedad+por+Nefelometr%C3%ADa.pdf/fc92342e-8bba-4098-9310-56461c6a6dbc>.
- Leal, I., Chirinos, E., Leal, M., Morán, H., & Barrera, W. (2003). Caracterización fisicoquímica de la vinaza del Agave Cocui y su posible uso agroindustrial. *Revista Multiciencias*, 3(2).
- Lenntech. (2019). *¿Cuáles son las consecuencias de una alta turbidez?* Recuperado el 19 de abril de 2019, de Lenntech. <https://www.lenntech.es/turbidez.htm#%20C2%BFCu%C3%A1les%20son%20las%20causas%20de%20la%20turbidez?>
- Lezcano, P., & Mora, L. (2011). Las vinazas de destilería de alcohol. Contaminación ambiental o tratamiento para evitarlo. *Instituto de Ciencia Ambiental*.

- Martinez, F. M., Jiménez, L. V. I., & Rivera, D. C. R. (2013). *Estudio exploratorio en el tratamiento de vinazas mediante fotocatalisis solar homogénea en un reactor de película descendente*. BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS, 9(2).
- Méndez, L., Miyashiro, V., Rojas, R., Cotrado, M., & Carrasco, N. (2004). *Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio*. Revista del Instituto de Investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Mc GrawHill.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Resolución 2086 de 2010. *Diario Oficial No. 47876 de 28 de octubre de 2010*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución 1207 de 2014. *Diario Oficial No. 49242 de 13 de agosto de 2014*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015. *Diario oficial 49486 de 18 de abril de 2015*.
- Molina, C. & Quiñonez, W. (2012). *Biodegradación anaeróbica de vinaza generada en la destilería Soderal y aprovechamiento energético del biogás como medio para bajar el impacto de gases de efecto invernadero* (Master's thesis).
- Moraña, L., Gil, M., Álvarez, F. & Salusso, M. (2017). *Disminución del potencial contaminante de vinazas de caña de azúcar por biotratamiento con Saccharomyces cerevisiae*. Universidad Nacional de Salta, Argentina. XXVI Congreso Nacional del Agua.
- Muñoz, J. & Ramos, M. (2014). *Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Pabón, S., & Suárez, J. (2009). *Arranque y operación a escala real de un sistema de tratamiento de lodos activos para aguas residuales de matadero*. Revista Ingeniería e Investigación, 29(2), 53-58.
- Peña, C. (2012). Control de oxígeno disuelto en un tanque de aireación de una planta piloto de lodos activados. Pontificia Universidad Javeriana.
- Pérez, O. A., & Rodríguez, A. (2017). *Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento*. Revista Escuela de Administración de Negocios (82), 1-26.
- Prando, R. (2015). *Biomás: definición y características*. UdelaR.
- Presidente de la República de Colombia. (1974). Decreto 2811 de 1974. *Diario Oficial No. 34243 de 18 de diciembre de 1974*.
- Ramalho, R. (s.f). *Tratamiento Secundario: El proceso de lodos activos*.

- Ramos, C. (2017). *Evaluación de un sistema de tratamiento de lodos activados para la remoción de carga orgánica en las aguas residuales domésticas generadas en el colegio San Viator*. Fundación Universidad de América.
- Reynolds, T. D., & Richards, P. A. (1996). *Unit operations and processes in environmental engineering* (Vol. 20). Boston, MA: PWS Publishing Company.
- Rivas, B., Nevárez, V., Bautista, R., Pérez, A., & Saucedo, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo*. *Agrociencia*, 37(2), 157-166.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F., México: Mc Graw Hill Education.
- Sigler, A. & Bauder, J. (2012). *Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales*. Universidad Estatal de Montana. Recuperado 3 de marzo de 2019. http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS%202012-11-15-SP.pdf.
- Silva, A. (2016). *Vinaza, el veneno silencioso de la caña de azúcar*. Recuperado el 11 de marzo de 2018, de TELÁM: <http://www.telam.com.ar/notas/201609/163396-vinaza-el-veneno-silencioso-de-la-cana-de-azucar.html>.
- Tecnologías Ecológicas Teco. (s.f.). *Manual de Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica -PTARD Universidad El Bosque-*. Bogotá, Colombia.
- Tesouro Ambiental. (2003). Centro de referencia y documentación. *INVEMAR*.
- Trujillo, D., Duque, L., Arcila, J., Rincón, A., Pacheco, S. & Herrera, O. (2014). *Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano*. *Revista ION*, 27(1), 17-34.
- Varila, J., & Díaz, F. (2008). *Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio*. Universidad El Bosque, Programa de Ingeniería Ambiental. Bogotá: Revista de Tecnología.
- Velásquez, D. (2009). *Efecto de vinazas sobre hongos que forman micorriza arbuscular y sobre fracciones de materia orgánica en un Molisol del Valle del Cauca*. Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Zúñiga, V., & Gandini, M. (2013). *Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol*. Cali: DYNA.

Glosario

Aerobio: Microorganismos que necesitan oxígeno (molecular) para respirar (Glosario y Tesauro de la Agroindustria de la Caña de Azúcar de Colombia, 2014).

Biomasa: Cantidad de materia viva o de origen biológico presente en un momento dado en un área determinada (Prando, 2015).

Biorreactor: Recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo. En algunos casos, un biorreactor es un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos (Varila y Díaz, 2008).

Conductividad eléctrica (CE). Es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición. Las soluciones de la mayor parte de los compuestos inorgánicos son buenas conductoras. Las moléculas orgánicas al no disociarse en el agua conducen la corriente en muy baja escala (IDEAM, 2006).

Color. Es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. Las medidas de color se hacen en laboratorio por comparación o fotómetro (Bonsai Menorca, 2019).

Demanda química de oxígeno (DQO): Medida que determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (IDEAM, 2007).

Lodos activados: Proceso de tratamiento aerobio de aguas residuales con cultivos de bacterias en suspensión (Tesauro Ambiental, 2003).

Nitritos y nitratos. Nitratos y nitritos son compuestos iónicos que se encuentran en la naturaleza, formando parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato (NO_3^-) es la forma estable de las estructuras oxidadas del nitrógeno. El nitrito (NO_2^-), es oxidado con facilidad por procesos químicos o biológicos a nitrato, o bien reducido originando diversos compuestos (Antón & Lizaso, 2001).

Oxígeno disuelto (OD). Es el oxígeno necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida aerobia. Es ligeramente soluble en el agua (IDEAM, 2004).

pH: El término pH es una forma de expresar la concentración de ion hidrógeno. En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución (IDEAM, 2007).

Reactor SBR: Sequential Batch Reactor es un sistema de lodos activados, cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de llenado y vaciado (Muñoz y Ramos, 2014).

Residuos industriales: Residuos de procesos industriales. Puede ser o no peligrosos (Tesauro Ambiental, 2003).

Sólidos disueltos totales (SDT). Es una medida de la materia en una muestra de agua, que no pueden ser removidos por un filtro tradicional. Esta suma de todos los minerales, metales, y sales disueltos en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua (Sigler & Bauder, 2012).

Sólidos suspendidos totales (SST). Es un tipo de sólido presente en las aguas, transportado gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua y que no se disuelven en ella (IDEAM, 2007).

Sólidos totales secados (STS). Se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C. Incluye materias disueltas (sólidos disueltos totales: porción que pasa a través del filtro) y no disuelto (sólidos suspendidos totales: porción de sólidos totales retenidos por un filtro) (IDEAM, 2007).

Tratamiento aerobio: Sistema de tratamiento del agua residual que se hace con presencia de oxígeno (Tesauro Ambiental, 2003).

Turbidez: La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión (Varila & Díaz, 2008).

Vinaza: Desecho industrial que se genera al producir alcohol utilizando la melaza de la caña de azúcar (Lezcano & Mora, 2011).