



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN Y LA
DISPOSICIÓN FINAL DE VINAZA Y LODOS
EN UNA PLANTA DE COMPOSTAJE DE UN
INGENIO AZUCARERO**

Autor

Laura Clavijo Jiménez

Universidad de Antioquia

**Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Química**

**Medellín, Colombia
2020**



**METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN Y LA DISPOSICIÓN FINAL DE
VINAZA Y LODOS EN UNA PLANTA DE COMPOSTAJE DE UN INGENIO
AZUCARERO**

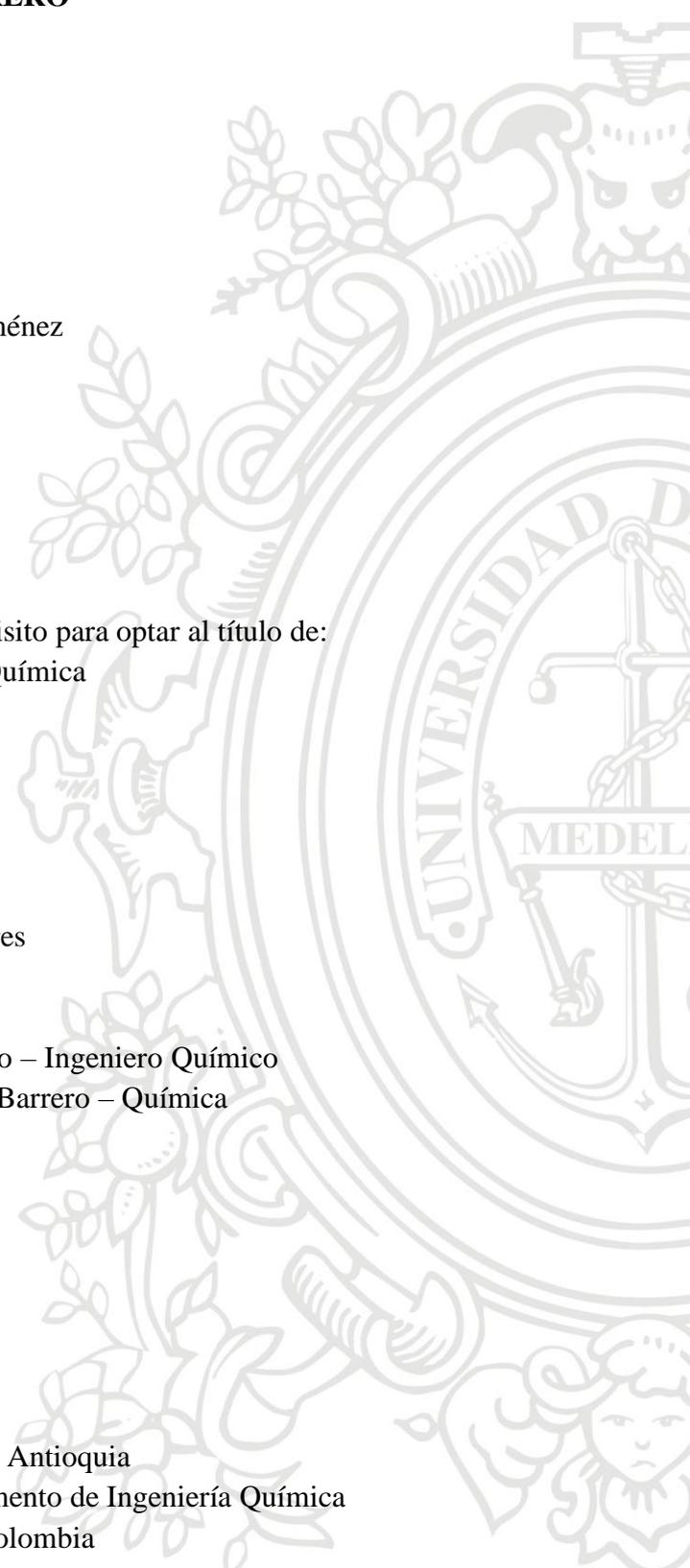
Laura Clavijo Jiménez

Informe de práctica como requisito para optar al título de:
Ingeniera Química

Asesores

Felipe Bustamante Londoño – Ingeniero Químico
Isabel Cristina Ospina Barrero – Química

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Medellín, Colombia
2020



METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN Y LA DISPOSICIÓN FINAL DE VINAZA Y LODOS EN UNA PLANTA DE COMPOSTAJE DE UN INGENIO AZUCARERO

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue presentar diversas propuestas, a partir de una misma problemática: altos volúmenes de vinaza, su acumulación y su disposición final, en una planta de compostaje de un ingenio azucarero.

De la acumulación de vinaza resultan sólidos sedimentables más conocidos como lodos que, si no se les da un adecuado tratamiento, pueden acumularse en las lagunas de almacenamiento de vinaza hasta colmarlas. Por este motivo, se hizo un estudio de datos históricos para calcular, a partir de las cantidades de vinaza que entran y salen del proceso, el porcentaje de acumulación de sólidos y el tiempo de retención hidráulica, y así conocer el tiempo en que determinada cantidad de vinaza tarda en colmar la laguna con sólidos. Para ello se evaluaron dos mecanismos para hacer el mantenimiento de las lagunas, el convencional y uno propuesto en este trabajo. Para ambos se calculó el tiempo que tomaría realizar el mantenimiento y el costo que tiene remover 1 m³ de lodo con cada uno de ellos. De esto se obtuvo que la relación beneficio-costos es mucho mayor con el mecanismo propuesto, pues evita inconvenientes con la maquinaria involucrada y reduce los costos hasta en un 50%.

Actualmente el proceso de compostaje cuenta con una reducción de bagazo y con la reaparición de un material carbonado: hoja de caña picada. Debido a esto se realizó una prueba a escala de laboratorio para conocer la capacidad de absorción de estos materiales carbonados que se compostan en el proceso. Esto se realizó en montajes con diferentes proporciones de material: 50% bagazo-50% hoja de caña picada, 60% bagazo-40% hoja de caña picada, 70% bagazo-30% hoja de caña picada y 100% bagazo. Aunque se obtuvo que, evidentemente, el montaje que contiene 100% bagazo es el que mayor capacidad de absorción tiene, el objetivo principal de esta prueba era conocer el volumen de saturación teórico en una pila de proceso real para así tener un adecuado control del proceso y evitar la presencia de lixiviados, los cuales corresponden a vinaza que drena por el exceso de humedad en las pilas. De esto se pudo concluir que el volumen de la pila es directamente proporcional al volumen de saturación.

Se sabe que al cambiar la formulación de material carbonado, disminuye la aplicación de vinaza. Por este motivo se utilizaron datos históricos y estrategias para hacer un seguimiento de temperatura, parámetro principal del proceso; con esto se pudo verificar que, a una edad aproximada de 30 días, el proceso de compostaje se encuentra iniciando la fase termófila, etapa en la cual los microorganismos presentes en el proceso se encuentran en su mayor actividad; con esto, se logró plantear una metodología para incrementar la aplicación de vinaza en el proceso, que posteriormente será probada e implementada.

Finalmente se sugiere que es de vital importancia tener estrategias para un buen seguimiento de los parámetros dentro del proceso, pues es con estos que se tiene pleno conocimiento del estado del mismo.

Palabras Clave: compostaje, vinaza, material carbonado, lodo de vinaza, temperatura.

INTRODUCCIÓN

Un ingenio azucarero es una empresa agroindustrial dedicada a desarrollar productos y servicios derivados de la caña de azúcar. En un ingenio, la caña de azúcar debe ser sometida a procesos fisicoquímicos y biológicos que permiten transformarla en azúcar, alcohol carburante y energía. [1][2] En estos procesos se generan residuos industriales que con un manejo adecuado se pueden transformar en productos con valor agregado, como el compost.

Parte de los residuos de un ingenio azucarero son sólidos, provenientes del proceso de producción de azúcar, como cachaza, bagazo, ceniza de bagazo y hoja de caña picada, y otra parte son líquidos, provenientes del proceso de producción de alcohol carburante, conocidos como vinaza; la relación vinaza-alcohol es 2:1, es decir, que por 1 litro de alcohol que produce la destilería, se producen 2 litros de vinaza. Este residuo líquido tiene un alto contenido de sólidos que, al sedimentarse hasta convertirse en lodos de vinaza, colmatan las rampas, lagunas y tanques, que es en donde generalmente se almacena. Para hacer un tratamiento adecuado de los residuos mencionados se puede recurrir a un proceso de compostaje, que busca convertirlos en un producto final estable mediante un proceso aeróbico. En este proceso se dan cambios fisicoquímicos y microbiológicos que se evidencian por medio de variables tales como temperatura, humedad y pH, y que dan cuenta de la actividad microbiana y, por ende, de la fase en que se encuentre el proceso. El tratamiento de los residuos se realiza en unidades y subunidades de proceso conocidos como módulos y pilas, respectivamente; dicho tratamiento toma hasta 70 días, tiempo en el cual se da la digestión de la materia orgánica presente hasta la obtención de un producto final llamado compost, que es un fertilizante orgánico-mineral de suelos. [1][2]

En este trabajo se plantea una metodología diferente a la convencional para la disposición final de lodos. Para esto se evaluó la capacidad de almacenamiento de las lagunas y el tiempo de retención hidráulica de sólidos, teniendo en cuenta la cantidad de vinaza que entra y sale del proceso. Con base en lo anterior, se propuso un mecanismo para remover los sólidos de las lagunas de almacenamiento, el cual se comparó con el mecanismo convencional calculando la relación costo-beneficio entre ambos.

Actualmente, el bagazo no es el único material carbonado en el proceso de compostaje dada la reaparición de la hoja de caña picada en el mismo. Por este motivo, también se evaluó la capacidad de absorción en varias mezclas bagazo- hoja de caña picada, con el fin de evidenciar cuál de ellas retiene más residuo líquido, pues al cambiar la formulación de material carbonado disminuye el volumen de aplicación de vinaza. Esta evaluación se hizo por medio de un ensayo a escala de laboratorio en donde se mezclaron, en diferentes proporciones, los materiales mencionados; a cada mezcla, se le aplicó una determinada cantidad de vinaza. El seguimiento se hizo con la medición de los lixiviados que se presentan y, finalmente se comparó cada experimento para determinar cuál mezcla tiene mayor capacidad de absorción. También, se evalúa la metodología que permita la aplicación de vinaza en las pilas de proceso, en especial el efecto que esto tiene en su disposición final en una planta de compostaje.

OBJETIVOS

Objetivo General

Plantear metodologías para incrementar la aplicación de vinaza en una planta de compostaje de un ingenio azucarero, y el efecto que esto tiene en su disposición final.

Objetivos Específicos

- Plantear metodologías para incrementar la aplicación de vinaza en un proceso de compostaje.
- Proponer un mecanismo para el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento de vinaza.
- Evaluar la relación costo-beneficio de la disposición final de lodos, comparando el mecanismo propuesto con el mecanismo convencional para el mantenimiento de las lagunas.
- Evaluar la capacidad de absorción de vinaza en una mezcla bagazo-hoja de caña picada.
- Determinar una estrategia de seguimiento de parámetros de control en un proceso de compostaje.

MARCO TEÓRICO

La agroindustria se enfoca en la transformación de productos procedentes de la agricultura, es decir, que a partir de productos obtenidos de la tierra se elaboran materias primas y derivados con mayor valor agregado. Además, la agroindustria de la caña ofrece alternativas energéticas limpias y renovables e invierte en investigación, lo que la ha hecho más productiva y competitiva. [4][5] En este sentido, desde hace varias décadas la agroindustria de la caña inició un proceso de diversificación y hoy produce mucho más que azúcar. Por ejemplo, incursionó en la cogeneración de energía contribuyendo así a la seguridad energética del país. Así mismo, acogiendo a la política pública ambiental y energética de producción de biocombustibles, a partir del año 2005 se pusieron en marcha plantas de producción de alcohol carburante, conocidas como destilerías; la destilación de alcohol es un proceso que consiste en cuatro etapas principalmente: fermentación, destilación, evaporación de vinaza y deshidratación. De este proceso, se obtiene el residuo líquido conocido como vinaza. [1][5]

Dada la necesidad de hacer un tratamiento adecuado a los residuos sólidos obtenidos del proceso de fabricación de azúcar y de cogeneración de energía, y al residuo líquido obtenido de la producción de alcohol carburante, surge la creación e implementación de un proceso de compostaje, proceso biológico aceptado como sostenible y utilizado en todos los sistemas asociados a la agricultura inteligente pues combina la protección del medio ambiente con una producción agrícola sostenible. En él, se estabilizan los residuos industriales derivados de los diferentes procesos mediante la activación de metabolismos microbianos en un proceso de descomposición aeróbico, hasta llevarlos a un producto reconocido como compost, que tiene un valor agregado de utilidad agrícola ya que es un fertilizante que mejora las características físicas, químicas y biológicas del suelo, evita la erosión y ayuda a la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.

Aunque no existe un único concepto sobre qué es la materia orgánica, se considera que ésta es cualquier tipo de material de origen animal o vegetal que regresa al suelo después de un proceso de compostaje en el que participan microorganismos. [6][7] La materia orgánica es uno de los componentes más importantes en el suelo ya que la base de todo sistema agrícola es un suelo fértil y saludable. El reciclaje de los residuos sólidos en los procesos llevados a cabo en un ingenio azucarero, desde el punto de vista medioambiental representa muchos beneficios.

El proceso de compostaje en un ingenio azucarero inicia con la recolección de las materias primas provenientes de los residuos sólidos orgánicos generados en el proceso de elaboración de azúcar (cachaza, bagazo, cenizas de la combustión de bagazo y hoja de caña picada) y el residuo líquido generado en la elaboración del alcohol carburante en la destilería (vinaza). La cachaza es obtenida como residuo del proceso de clarificación del jugo de caña en la planta de producción de azúcar; este material ingresa a la planta con una humedad de aproximadamente 70% lo cual dificulta el inicio del proceso de descomposición aeróbico. El bagazo es un residuo fibroso con alto contenido de carbono generado durante el picado y molienda de la caña de azúcar. La ceniza es el residuo generado en el proceso de combustión de bagazo y carbón para la generación de vapor en las calderas que operan con este combustible. La hoja de caña es el residuo generado en el proceso de cosecha, la cual es picada antes de ser llevada a la planta de compostaje. Finalmente, la vinaza es un residuo líquido de la generación de alcohol carburante, la cual tiene altos contenidos de DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) y nivel bajo de pH (pH ácido), que, si no es tratado adecuadamente, es muy contaminante; sin embargo, es rica en sales de importancia agronómica; su composición es generalmente del 75-85% de agua y 15-25% de sólidos. [7]

En una planta de compostaje se cuenta con unidades de tratamiento o módulos, en los cuales se introducen los residuos a compostar, proceso que toma aproximadamente 70 días. Cada módulo está compuesto por sub-unidades de tratamiento o pilas piramidales constituidas por capas de los diferentes residuos sólidos. Un porcentaje del total de los módulos está destinado para el pretratamiento de los materiales carbonados, es decir el bagazo y, en ocasiones una mezcla de bagazo y hoja de caña picada, mediante la saturación con vinaza, para luego ser incorporados a las pilas de proceso. Esta tarea se realiza por medio de una máquina mezcladora, que es un equipo mecánico e hidráulico dotado de una estructura tipo túnel y de un rotor con un sistema de aspas dispuestas de tal manera que permiten conservar la forma piramidal de las pilas. La máquina mezcladora se encarga de mezclar, airear y aplicar vinaza en las pilas de proceso y de materiales carbonados. [7]

La vinaza es transportada desde la destilería hasta lagunas de almacenamiento a través de una tubería subterránea, rampas y tanques horizontales, para una capacidad total de almacenamiento de 33179 m³. Luego, la vinaza es bombeada y aplicada sobre el material que está en proceso de degradación. La base de las lagunas en donde se almacena la vinaza está compuesta por cuatro capas de material (arcilla, geomembrana, geotextil y balastro) para evitar su filtración y garantizar así la protección del suelo. Durante el almacenamiento, la vinaza se sedimenta por acción de la gravedad, resultando en la formación de lodos en el fondo de la laguna; dichos lodos deben extraerse para darles una disposición adecuada. Por ejemplo, los lodos se depositan en un dique para ser mezclados con materias primas o material en proceso. El mantenimiento de las lagunas se hace por medio de cargador y vagón auto volteo; los cargadores son equipos mecánicos e hidráulicos empleados para el manejo de materias primas y producto terminado; están compuestos por un brazo metálico que lleva en su extremo un balde. Los vagones auto volteo son una canasta metálica con ruedas, dotada de

cilindros hidráulicos que le permiten volcar de costado su carga; se usan principalmente para el transporte de bagazo, residuos de patios y de compost ocasionalmente. Para la tracción de los vagones auto volteo, se emplea un tractor. [7]

Las pilas mencionadas se someten a un proceso de compostaje aeróbico en el cual se dan cambios fisicoquímicos y microbiológicos que se evidencian por medio de variables tales como temperatura, humedad y pH. Durante este proceso, el aumento de la temperatura es el mejor indicador de la actividad microbiana, presentándose cuatro estados de temperatura: en la primera etapa, el material se encuentra en una fase mesófila que es en donde el material comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente, y en pocos días (incluso horas) la temperatura aumenta hasta los 45-50°C. La actividad metabólica de los microorganismos mesófilos, es de carácter exotérmico por lo que la temperatura va aumentando y se generan las sucesiones microbiológicas, apareciendo así los microorganismos termófilos. En esta fase termófila, aumenta la temperatura del material entre los 51 y 73°C, hasta llevarlo a un grado de descomposición donde su carbono orgánico oxidable no sea inferior al 5%, de acuerdo con la NTC 5167; esta fase puede durar desde unos días hasta meses, según el material de partida, las condiciones climáticas y el lugar. Se habla de una tercera fase del compostaje, conocida como fase de enfriamiento o mesófila II, en donde la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45°C; esta fase requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración, que es un periodo que tarda varios meses a temperatura ambiente. En la Figura 1 se presentan los diferentes estados de temperatura. [6] [7]

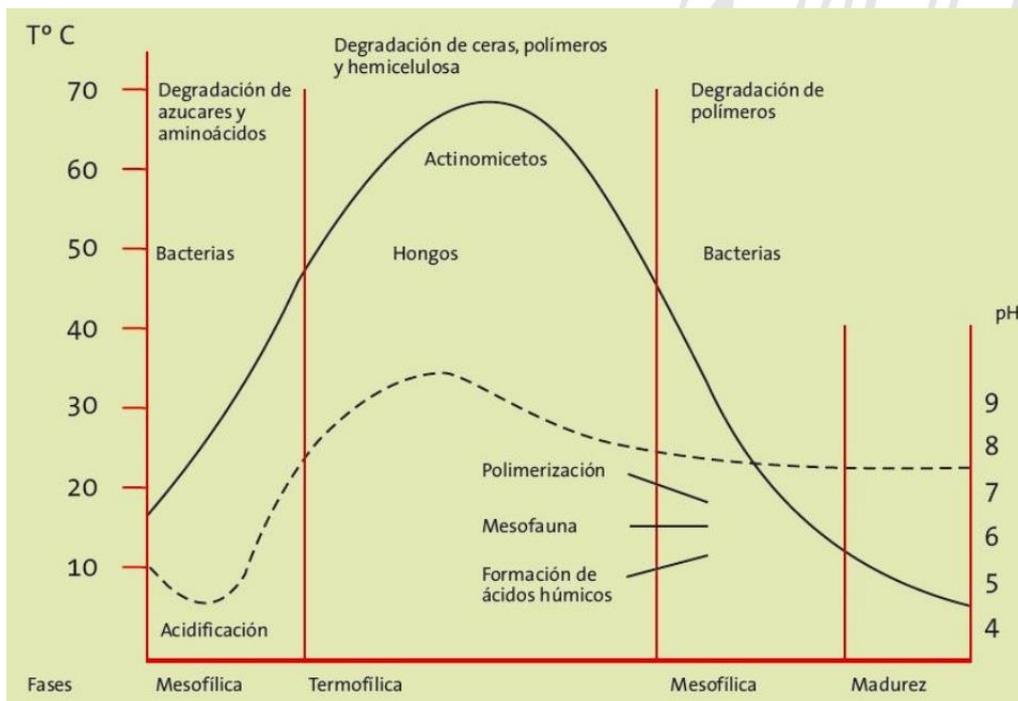


Figura 1. Curva de compostaje [8]

Dada la naturaleza del proceso de compostaje, es necesario realizar volteos a las pilas para airearlas y que de esta manera los microorganismos respiren; esto, además, evitará que el material se compacte. El número de volteos que se realice en cada pila dependerá de su temperatura y de la fase en la que se encuentre, pues un exceso de aireación provocaría un descenso de temperatura y una pérdida de humedad en la pila, y una baja aireación impediría la evaporación del agua generando exceso de humedad; en ambos casos, se frena el proceso de descomposición. Los volteos de las pilas, se realizan con la máquina mezcladora. [6][7]

METODOLOGÍA

- **Planteamiento de una metodología para incrementar la aplicación de vinaza en un proceso de compostaje.**

Para iniciar la evaluación de una metodología que permita incrementar la aplicación de vinaza, se realizó una investigación detallada acerca del proceso de compostaje, haciendo uso de los datos históricos del mismo en donde se logró identificar, por medio de las temperaturas registradas, en qué fase, mesófila o termófila, se encontraba cada pila de proceso de acuerdo con su edad y el número de volteos que había tenido. También se realizó un trabajo de campo al interior de la planta de compostaje, para lo cual se tomaron pilas de proceso de cierto módulo y se hizo un seguimiento durante diez días consecutivos por medio de la toma de temperatura, lo que equivale al pretratamiento para iniciar el ensayo. Con dichas temperaturas se hizo un comparativo del comportamiento de las pilas con los datos históricos y, además, se logró identificar en qué fase se encontraban dichas pilas.

Finalmente, con base en lo estudiado y en lo planteado junto con personal de Cenicaña (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia) se propuso un ensayo que a futuro será implementado en las pilas de proceso y, por tanto, no será desarrollado en este trabajo. Sin embargo, a continuación, se describe.

Con base en los estados previamente estudiados, establecidos y relacionados con las demás variables de proceso (pH, humedad, número de volteos de la pila), se tomarán pilas de proceso que se encuentren en fase termófila y tengan una edad de 30 días aproximadamente, para realizar aplicaciones de vinaza directamente en las pilas de proceso, haciendo un seguimiento permanente de la temperatura para evaluar si al aplicar vinaza en el rango de edad de 30-40 días ésta no disminuye. Se debe tener en cuenta al realizar aplicaciones sucesivas que el proceso tendrá una dinámica intermitente. De esta manera, se logrará identificar en qué volumen se puede incrementar la aplicación de vinaza en cada pila de proceso, garantizando que no se afecte la fase termófila.

Para ello, se plantearon cuatro tratamientos:

1. Aplicar 5 m³ de vinaza por 10 días consecutivos. Así, se aplicarían 50 m³ de vinaza en total.
2. Aplicar 5 m³ de vinaza, día de por medio, durante 10 días. Así, se aplicarían 30 m³ de vinaza en total.
3. Aplicar 10 m³ de vinaza, día de por medio, durante 10 días. Así, se aplicarían 60 m³ de vinaza en total.
4. Aplicar 15 m³ de vinaza, cada 5 días, durante 10 días. Así, se aplicarían 45 m³ de vinaza en total.

Los tratamientos mencionados, serán realizados en dos etapas. Por este motivo se realizarán dos ensayos; el ensayo 1 estará compuesto por los tratamientos 1 y 4 y, el ensayo 2 estará compuesto por los tratamientos 2 y 3. Cabe aclarar que cada ensayo tendrá una pila de control (o blanco), que será una pila de proceso. Para implementar los ensayos mencionados, se deberá hacer un estricto seguimiento de la temperatura en las pilas seleccionadas para ello, tanto 10 días antes de dar inicio (paso realizado) como durante los 10 días que dura cada ensayo; de igual manera se deberá hacer un seguimiento de la temperatura ambiente en la

planta. Para el seguimiento de la temperatura, se harán entre 5 y 8 tomas de temperatura en el día, en lo posible, siempre a la misma hora.

Con base en los resultados que se obtengan y el volumen adicional de vinaza que se logre aplicar a las pilas de proceso, se evaluará el impacto que esto tiene en el proceso de compostaje; de obtener impactos positivos, se garantizará la repetibilidad del ensayo y se propondrá un plan de acción que permita incrementar el volumen de aplicación de vinaza en todo el proceso. Adicionalmente, se realizarán análisis fisicoquímicos al producto terminado para caracterizarlo y compararlo con los parámetros a garantizar de un fertilizante orgánico-mineral sólidos bajo de la Norma Técnica Colombiana 5167 (NTC 5167). [3]

- **Planteamiento de una metodología que proponga un mecanismo para el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento de vinaza, con base en la evaluación de la relación costo-beneficio de la disposición final de lodos, comparando el mecanismo propuesto con el mecanismo convencional.**

Como se mencionó anteriormente, el mantenimiento convencional se realiza por medio de cargadores, que pueden ocasionar daños con altas repercusiones económicas, y vagones auto volteo. Además, los sólidos que se extraen generalmente se disponen en un dique que ocupa espacio de pilas de proceso u algún otro espacio de la planta. En ese sentido, se propuso un sistema de bombeo adecuado para transportar los sólidos suspendidos en las lagunas, con el fin de poder hacerlo de una manera más eficiente, económica y segura. Se recomendó, entonces, el uso de una bomba de desplazamiento positivo pues permite bombear fluidos a altas presiones, y que tengan alta viscosidad y alto contenido de sólidos. [9]

De esta manera, se planteó una metodología que permitió proponer una manera diferente a la convencional, para hacer el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento. Para ello se evaluó la capacidad de almacenamiento de las lagunas y se calculó el tiempo de retención hidráulica de sólidos, teniendo en cuenta la cantidad de vinaza que entra y sale del proceso. Con base en lo anterior, se propuso un mecanismo que permitirá remover los sólidos de las lagunas de almacenamiento. Finalmente, se comparó el mecanismo propuesto con el mecanismo convencional y se evaluó la relación costo-beneficio entre ambos.

Para iniciar la evaluación, se tomaron los datos requeridos del año 2019 para hacer los respectivos cálculos. Primero se hizo un balance de masa general y con base en el porcentaje de sólidos a la entrada y salida del proceso, se calculó la cantidad de sólidos que se almacena en una laguna, asumiendo que está en un 50% de capacidad. Luego se calculó el tiempo de retención hidráulica para conocer al cabo de cuantos días se debe hacer el mantenimiento a la laguna. Posterior a ello, se plantearon los dos escenarios, mantenimiento convencional y el propuesto, y se calculó el tiempo que tomaría hacerlo con cada uno y su respectivo costo. Finalmente se hizo la comparación que llevó a proponer una manera diferente para hacer el mantenimiento, como idea innovadora para considerar en la planta de compostaje.

Los cálculos realizados, se muestran en las memorias de cálculo # 1 ubicadas en los anexos.

- **Evaluación de la capacidad de absorción en una mezcla bagazo-hoja de caña picada.**

Para evaluar la capacidad de absorción de vinaza en una mezcla bagazo-hoja de caña picada, se realizó una prueba a escala laboratorio en donde se simuló la dinámica de los módulos de

pretratamiento de los materiales carbonados (mencionados anteriormente) mediante la sobresaturación con vinaza, para conocer el volumen de saturación. Se realizaron cuatro montajes, cada uno con 1500 g de material (ver registro fotográfico en anexos), distribuidos de la siguiente manera:

1. Mezcla 50% bagazo – 50% hoja de caña picada
2. Mezcla 60% bagazo – 40% hoja de caña picada
3. Mezcla 70% bagazo – 30% hoja de caña picada
4. 100% bagazo

En cada uno de los montajes, se realizó la aplicación de vinaza hasta sobresaturar el material; en cada aplicación se mezcló el material, primero para homogenizar la mezcla y segundo para simular los volteos que realiza la máquina mezcladora. Cuando se notó que el material estaba sobresaturado y que en su defecto había presencia de lixiviados (vinaza que drena a causa de la sobresaturación) se detuvo la aplicación de vinaza. Luego, se recogió y se midió en una probeta conociendo así el volumen de lixiviados generados en cada una de las mezclas. Finalmente, con el volumen aplicado y con el volumen de lixiviados obtenido para cada uno de los montajes, se pudo obtener el volumen de saturación. Con el volumen de saturación y el volumen de una pila real, se obtuvo el volumen de saturación que tendría una pila de proceso. Con esto además se evidenció cuál de las mezclas tiene la mayor capacidad de absorción.

Los cálculos realizados, se muestran en las memorias de cálculo # 2 ubicadas en los anexos.

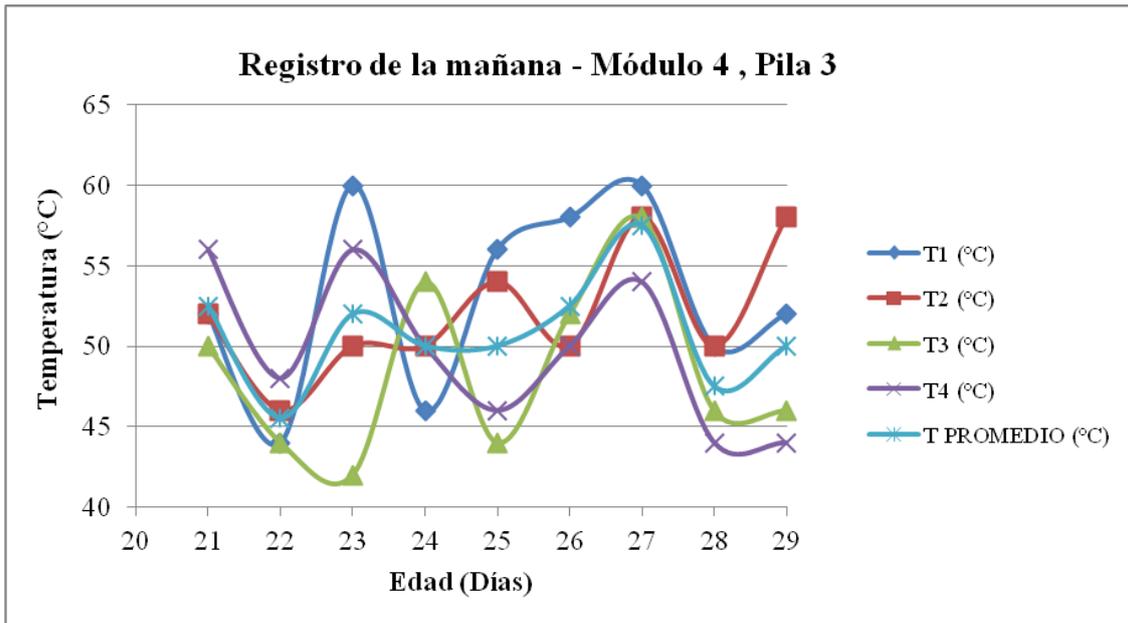
Finalmente, se realizó una evaluación general de los resultados con lo cual se determinó una estrategia de seguimiento de parámetros de control en el proceso y se generó una serie de recomendaciones para el incremento en la aplicación de vinaza y disposición final de sólidos, con base en los datos históricos y actuales de la planta de compostaje de un ingenio azucarero.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

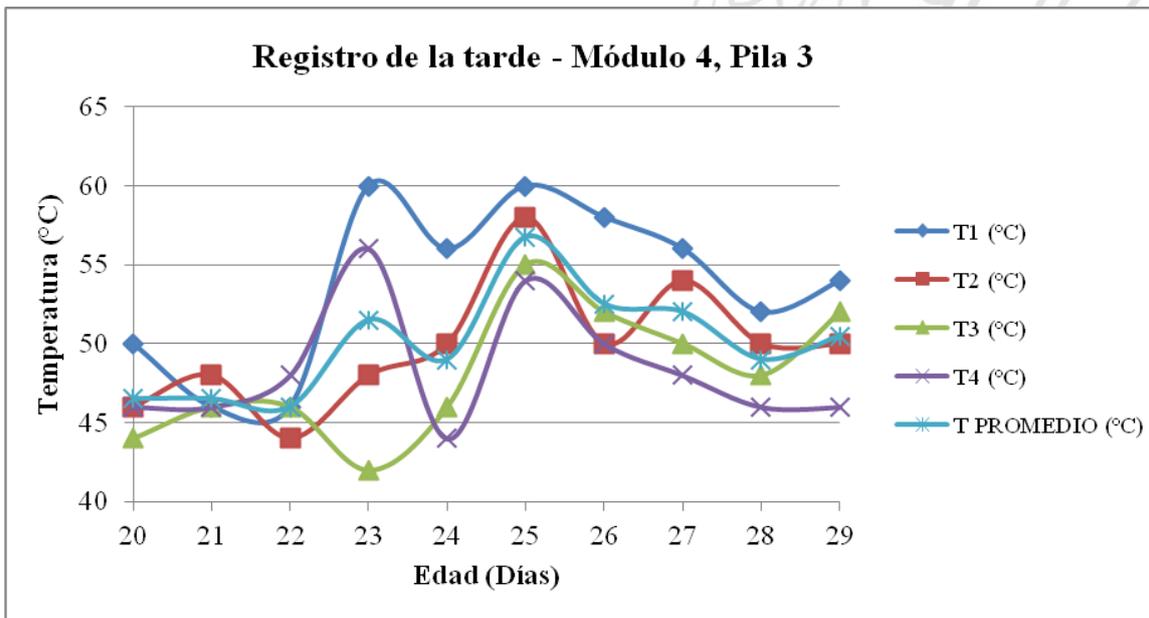
- **Planteamiento de una metodología para incrementar la aplicación de vinaza en un proceso de compostaje**

Primero se mostrarán los resultados obtenidos en la primera fase de la metodología planteada para incrementar el consumo de vinaza.

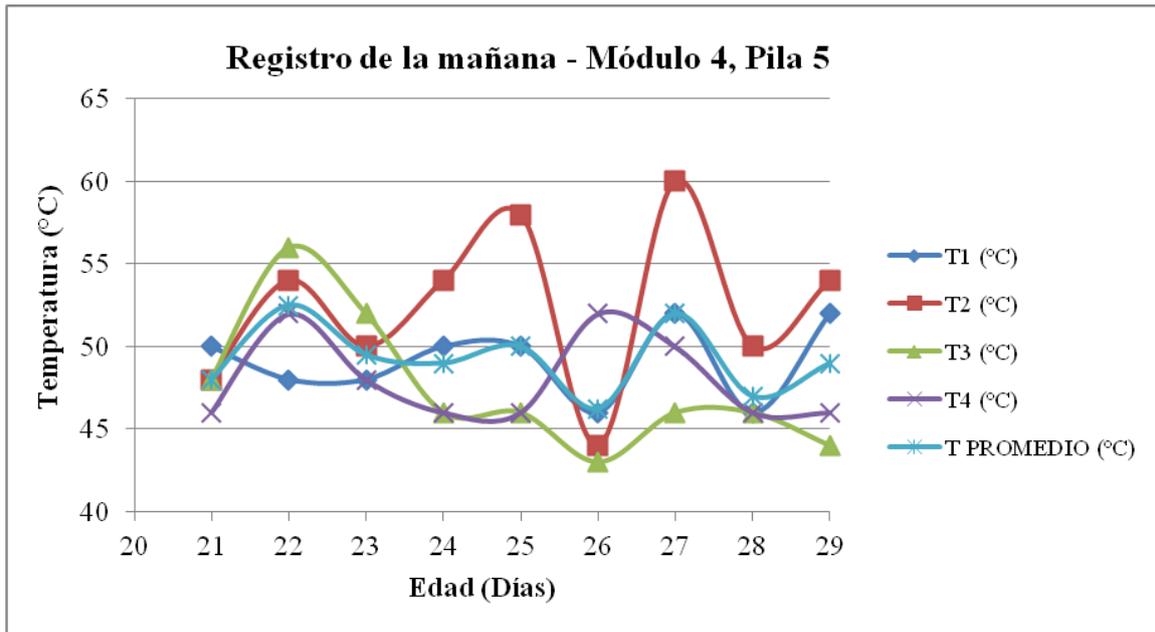
Se realizó el pretratamiento y seguimiento previo de temperatura durante diez días, es decir en el rango de edades de 20-30 días, tanto en la mañana como en la tarde a diferentes subunidades de proceso. En las gráficas 1 a 6, se muestran los valores registrados.



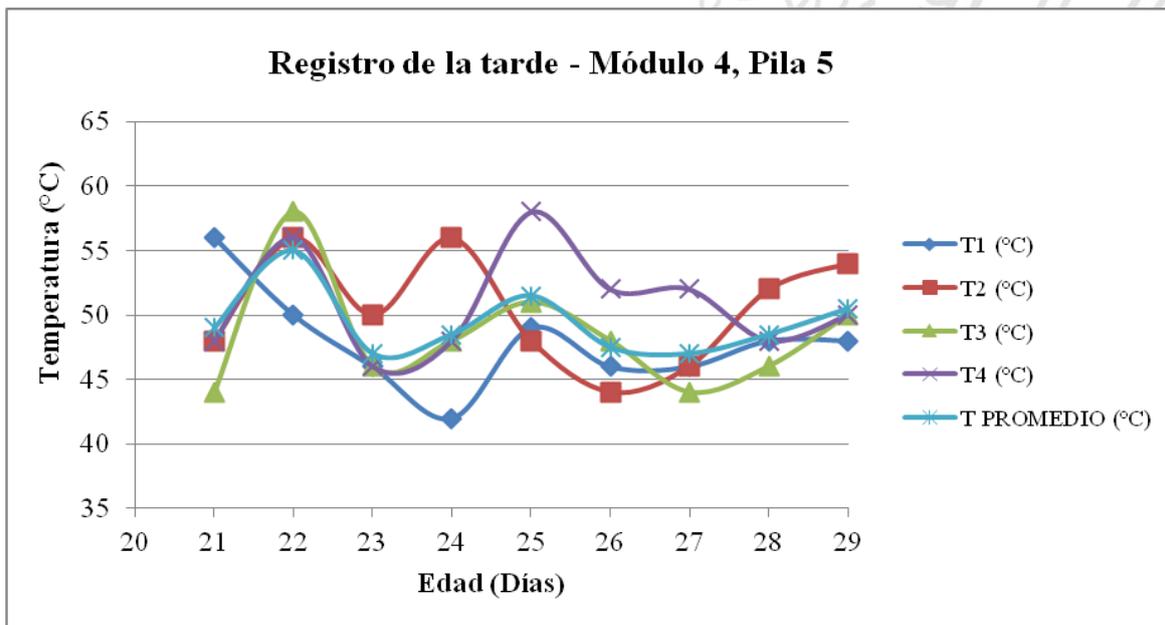
Gráfica 1. Registro de temperatura en la mañana.



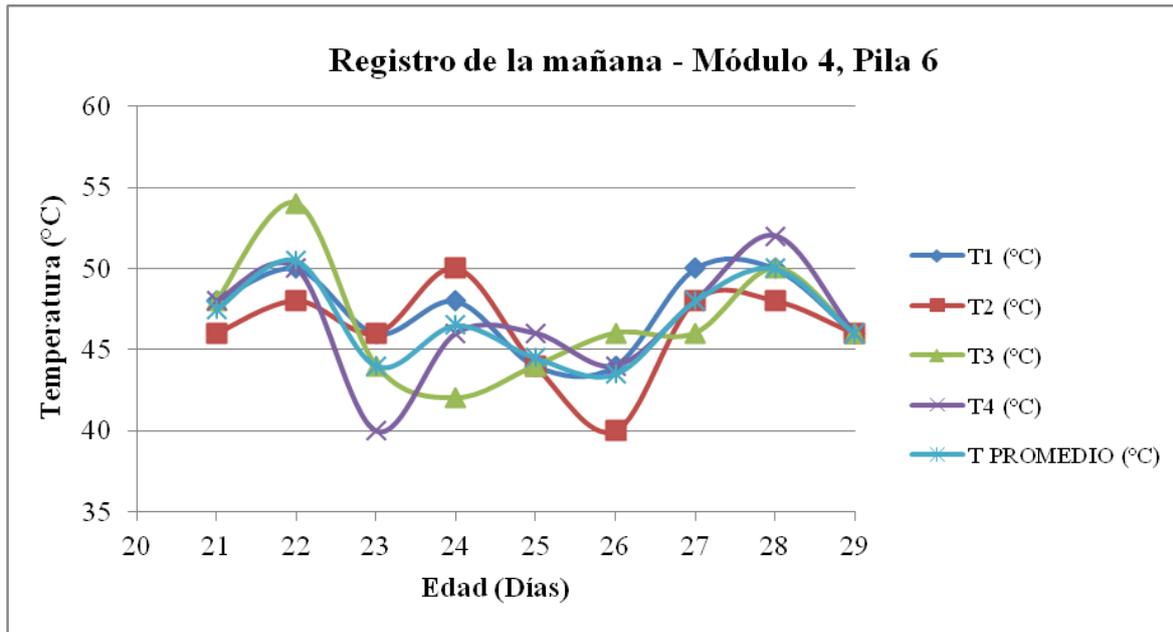
Gráfica 2. Registro de temperatura en la tarde



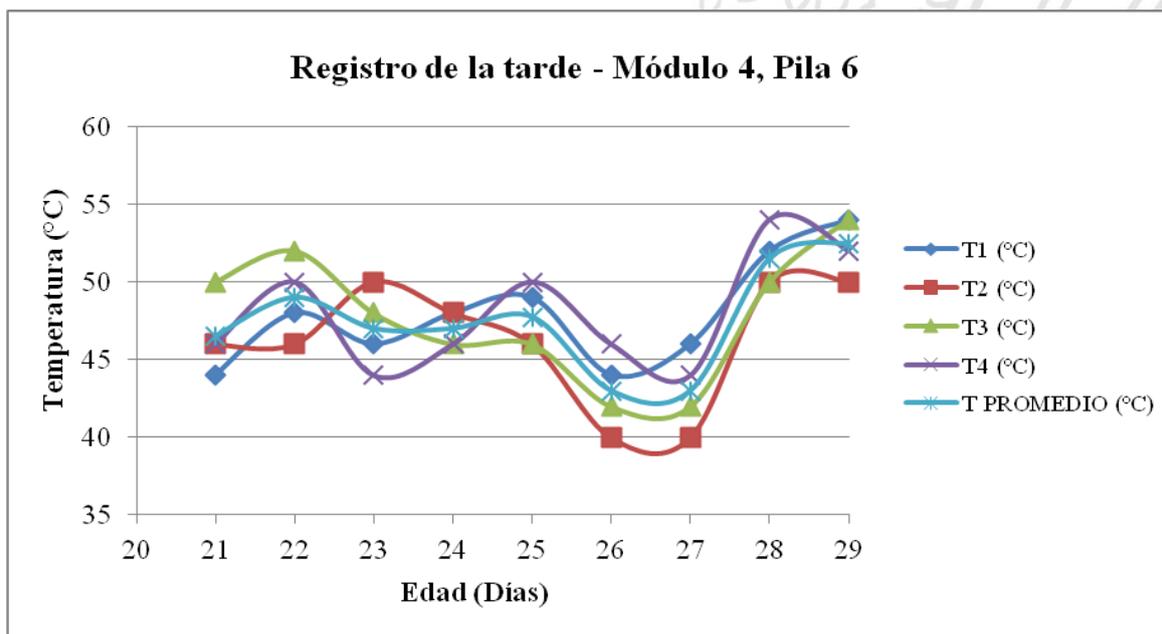
Gráfica 3. Registro de temperatura en la mañana.



Gráfica 4. Registro de temperatura en la tarde.



Gráfica 5. Registro de temperatura en la mañana.



Gráfica 6. Registro de temperatura en la tarde.

En las gráficas se puede observar que el comportamiento a lo largo de la pila no es homogéneo, lo cual es de esperarse al ser este un proceso biológico. Se evidencia que en algunos puntos de las pilas la temperatura es más alta que en otros, lo que permite determinar en qué fase se encuentra el proceso, mesófila o termófila. Sin embargo, en cada gráfica se puede observar un comportamiento promedio de la temperatura para cada caso y, con esto se puede deducir que en un rango de edades de 20-30 días (tiempo en el cual se hizo el pretratamiento) el proceso se encuentra iniciando la fase termófila. Dicho comportamiento fue comparado con datos históricos del proceso de compostaje, razón por la cual se puede afirmar que este comportamiento coincide con el esperado. También, se evidencian cambios bruscos de temperatura, lo cual puede ser atribuido a los volteos que tienen las pilas durante el proceso; como en este procedimiento lo que se busca es airear la pila, es de esperarse que la temperatura decaiga unos cuantos grados y vuelva incrementar de acuerdo con el

comportamiento de los microorganismos. Sin embargo, es importante tener un control de la temperatura para garantizar que dichos cambios no sean tan bruscos y que la temperatura se recupere y llegue así a la fase termófila.

En la metodología planteada se sugiere hacer el pretratamiento a una edad de 20 días e iniciar con las aplicaciones de vinaza a una edad de 30 días, para garantizar la fase termófila en el proceso. Sin embargo, considerando los datos registrados puede sugerirse que el pretratamiento se realice a una edad de 30 días y la aplicación a una edad de 40 días para que el proceso esté en la fase termófila y no en el inicio de ésta. De esta manera, puede esperarse un comportamiento más constante y estable ya que los microorganismos estarán en su etapa de mayor actividad; claramente se deben revisar datos históricos para dichas edades y realizar los pretratamientos necesarios para verificar el supuesto.

- **Planteamiento de un mecanismo diferente al convencional para realizar el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento de vinaza.**

Ahora se mostrarán los resultados obtenidos luego de proponer un mecanismo diferente al convencional para realizar el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento.

Cabe mencionar que los datos tratados y mencionados en este trabajo son tomados directamente de las bases de datos de una planta de compostaje de un ingenio azucarero y que dichos datos son los reportados para el año 2019. También, que, aunque a pesar de que los datos son completamente reales, se debieron hacer suposiciones al considerar que faltan datos de mayor precisión.

Lo primero que se analizó fueron los datos de entrada y salida de vinaza ya que de ellos y del contenido de sólidos reportados, va a depender la cantidad de lodo que se retenga en la laguna. En este punto, también es importante conocer el porcentaje de ocupación de sólidos en la laguna, pues de esto, y de la acumulación de los mismos, va a depender el tiempo de retención hidráulica; con esto último se va a tener pleno conocimiento del tiempo que demorará en colmatarse de sólidos una laguna, y en cuánto tiempo se debería estar preparado para los mantenimientos. Este valor puede cambiar de acuerdo con las necesidades y comportamientos del proceso y al porcentaje de ocupación que se defina.

En la tabla 1, se muestran los resultados obtenidos al evaluar económicamente los mecanismos para el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento, el convencional y el propuesto.

Tabla 1. Comparación del costo de los mecanismos de mantenimiento de las lagunas.

MECANISMO CONVENCIONAL	
Costo total (\$/m ³)	9.350
MECANISMO PROPUESTO	
Escenario	Costo total (\$/m³)
Sin energía eléctrica	434
Con energía eléctrica	800
Sin energía eléctrica + Vagón auto volteo	3.434
Con energía eléctrica + Vagón auto volteo	3.800

En la tabla 1, se muestra el costo que tiene remover 1 m³ de lodos en diferentes escenarios. Se plantean cuatro posibles escenarios diferentes con los que se puede realizar el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento. Sin embargo, es claro que cualquiera de los mecanismos propuestos, aunque unos más que otros, resultan ser hasta un 50% más económicos respecto al convencional, lo que lleva a que tenga una relación beneficio-costos mayor.

Sin embargo, la relación beneficio-costos de los mecanismos no puede evaluarse solamente desde el punto de vista económico. Para ello es necesario evaluar otros factores como la disponibilidad de equipos ya que, por ejemplo, la principal tarea del cargador no es realizar mantenimientos en las lagunas. De hecho, realizar el mantenimiento con este equipo, puede acarrear, aparte de daños, mayores costos, pues: a) se está dejando de priorizar tareas propias del cargador por hacer un mantenimiento que, si bien no es una tarea cotidiana, en el momento que se requiera deberá suspenderse o postergarse; b) el daño que puede sufrir el cargador lo que lleva a mantenimientos o en su defecto reparaciones que se traducen en más tiempo que esta máquina demorará en retornar a sus labores y, lo que puede provocar retrasos en el proceso productivo; esto último no solo conllevará consecuencias operativas si no también, económicas.

- **Evaluación de la capacidad de absorción de una mezcla bagazo-hoja de caña picada.**

Ahora se mostrarán los resultados obtenidos de capacidad de absorción de mezclas bagazo-hoja de caña picada y sus volúmenes de saturación teóricos al llevarlas a una escala real.

Tabla 2. Volúmenes de aplicación, lixiviados y saturación, en pilas de material carbonado.

Mezcla	Volumen aplicado (m³)	Volumen lixiviado (m³)	Volumen de saturación teórico (m³)
50/50	0,0055	0,0014	285,6600
60/40	0,0065	0,0017	334,6500
70/30	0,0065	0,0013	357,4200
100	0,0090	0,0010	443,2560

Tabla 3. Volumen de saturación y diferencia de volumen de aplicación.

Mezcla	Volumen total de saturación (m³)	Diferencia volúmenes (m³)
50/50	3999,2400	2206,3440
60/40	4685,1000	1520,4840
70/30	5003,8800	1201,7040
100	6205,5840	N/A

En la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos de la prueba realizada para determinar la capacidad de absorción de material carbonado en diferentes proporciones. Uno de los inconvenientes de las plantas de compostaje en ingenios azucareros, es que el bagazo no es el único material carbonado que debe tratarse y, a medida que los ingenios se preparan para producir una mayor cantidad de energía eléctrica mediante la construcción de calderas, el bagazo disponible como residuo para compostar es menor. Es por esto que es importante conocer la capacidad de absorción de las mezclas pues no siempre habrá solo bagazo como material carbonado. Si bien es cierto que el bagazo es un material con alto contenido de fibra

y, como era de esperarse, el montaje de 100% bagazo fue el que más vinaza absorbió, poder estimar los volúmenes reales de saturación a partir de una prueba que mida la capacidad de absorción será una herramienta para hacer un plan de aplicación más óptimo y eficiente en el proceso.

Los valores de volumen aplicado y lixiviado de la tabla 2 corresponden a los datos obtenidos en el ensayo, es decir son datos que se obtiene a pequeña escala, pero que, al ser tratados y llevados a escala real, pueden dar idea del volumen de saturación real, datos también mostrados en dicha tabla.

En ese sentido, los datos allí mostrados indican cuál es el volumen máximo de vinaza que se puede aplicar por pila, de acuerdo con la proporción de mezcla de material carbonado en su armado: valores superiores a estos, provocarán la presencia de lixiviados; los lixiviados corresponden a vinaza que drena por la sobresaturación (exceso de humedad) del material durante el proceso de compostaje. Estos residuos pueden ser contaminantes para el suelo y el medio ambiente y, generalmente tienen aspecto oscuro, pH ácido y mal olor. [6]

En la tabla 3, se muestra el volumen total de saturación, que es equivalente a los dos módulos de saturación de material carbonado. Cada módulo cuenta con 8 pilas de proceso, pero para el cálculo sólo que consideraron 6, pues una de ellas es de armado y la otra de consumo. En este sentido, los volúmenes totales reportados en la tabla 3 corresponden al volumen que, teóricamente, podría aplicarse en 16 pilas de acuerdo con la proporción de mezcla planteada. Con base en ese cálculo y en los resultados obtenidos, se calcula la diferencia de volumen entre una pila armada con 100% bagazo y otra con una mezcla bagazo-hoja de caña picada. En este caso, se compara con las proporciones planteadas y los resultados obtenidos se registran también en la tabla 3. Así, al armar una pila con una proporción de materiales carbonados 50/50, 60/40 y 70/30 se estarían dejando de aplicar 2206,3440 m³, 1520,4840 m³ y 1201,7040 m³ de vinaza respectivamente, en las 16 pilas de los dos módulos de saturación.

Además, si el principal objetivo es incrementar el volumen de aplicación de vinaza, se debe prestar bastante atención a los volúmenes de saturación pues se está aplicando un volumen tal que genera la presencia de lixiviados, haciendo que una gran aplicación de vinaza sea innecesaria y por el contrario traiga más inconvenientes que beneficios. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, en el proceso a escala real, a medida que la máquina mezcladora aplica vinaza y hace el volteo del material, la hoja de caña se desintegra un poco más, y que, a medida que el proceso avanza, el volumen de la pila va disminuyendo gradualmente por el constante movimiento que sufre.

Por tal motivo, se recomienda hacer un constante monitoreo, a diferentes etapas y edades del proceso, para conocer cuál es el volumen real de saturación de vinaza en cada uno de ellas, pues éste y el volumen de la pila son directamente proporcionales.

Por último, y de manera general, es importante resaltar que un adecuado control de parámetros dentro de un proceso de compostaje es vital para conocer su estado, ya que al ser este un proceso biológico, especialmente datos de temperatura, humedad y pH son fundamentales para saber y predecir su comportamiento y tomar decisiones certeras a cerca del proceso y su buen funcionamiento operacional.

CONCLUSIONES

- Se logró plantear una metodología que permite incrementar la aplicación de vinaza en las pilas de proceso de compostaje. Conforme se realicen los ensayos, se podrá definir concretamente las proporciones para una aplicación más óptima.
- Se pudo verificar mediante un riguroso seguimiento de temperatura, que, a una edad aproximada de 20 días, el proceso se encuentra iniciando la fase termófila. Con esto se comprueba que efectivamente la temperatura es un parámetro muy importante en un proceso de compostaje, pues mediante ella se puede hacer tener un estricto control del comportamiento de los microorganismos.
- Se logró proponer un mecanismo diferente al convencional para realizar el mantenimiento de las lagunas de almacenamiento. Mediante el mecanismo propuesto, se espera que pueda haber diferentes opciones u escenarios para la disposición final de los lodos, que permitan, mediante experimentación, definir cuál es más conveniente operativa y económicamente.
- Se evidenció que el mecanismo propuesto tiene una alta relación beneficio-costos, y además es favorable respecto al mecanismo convencional pues podría brindar mayor disponibilidad de equipos y, a su vez, menos mantenimientos de éstos.
- Se logró determinar el volumen de vinaza que se deja de aplicar en los módulos de saturación con la disminución de bagazo y la reincorporación de hoja de caña picada al proceso.
- Es importante que dentro de un proceso de compostaje se tenga control de todas las variables que compongan al sistema y de su dinámica, pues al evaluar los datos de manera global se pueden hacer proyecciones del comportamiento del proceso lo que puede llevar a predecir el tiempo aproximado en que una laguna se colmata y, a su vez, el tiempo en que se le hace mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “PROCESOS INCAUCA S.A.”
- [2] “Procesos de Incauca S.A.S.” [Online]. Available: <https://www.incauca.com/es/procesos/>. [Accessed: 10-Feb-2020].
- [3] “NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 5167 PRODUCTOS PARA LA INDUSTRIA AGRICOLA. PRODUCTOS ORGANICOS USADOS COMO ABONOS O FERTILIZANTES Y ENMIENDAS O ACONDICIONADORES DE SUELO,” 2011.
- [4] “¿Qué es la agroindustria?” [Online]. Available: <https://www.elcampesino.co/que-es-la-agroindustria/>. [Accessed: 12-Feb-2020].
- [5] “El Sector Agroindustrial de la Caña impulsa a Colombia.” [Online]. Available: <http://www.procana.org/new/de-interes/item/329-el-sector-agroindustrial-de-la-cana-impulsa-a-colombia.html>. [Accessed: 12-Feb-2020].
- [6] “Manual de compostaje del agricultor | FAO.” [Online]. Available: <http://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/339921/>. [Accessed: 10-Feb-2020].

- [7] “Plan de Ensayo e Inspección Planta de Compostaje - Código interno R650001.” .
- [8] “Compostaje - Servicio de Sistema Ecológicos de Producción.” [Online]. Available: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/Compostaje_16.pdf. [Accessed: 12-Feb-2020].
- [9] “Bombas Moyno 2000.” [Online]. Available: http://www.moyno.com/dmdocuments/spanish_120D.pdf. [Accessed: 10-Feb-2020].



ANEXOS

• Memorias de cálculo # 1

Se debe tener claro que en la planta de compostaje existen cinco lagunas de almacenamiento de vinaza. Las lagunas 1, 2 y 3 tienen una capacidad de almacenamiento de 6393 m³ y, las lagunas 4 y 5 tienen una capacidad de almacenamiento de 7000 m³. Con esto, se tiene una capacidad total de almacenamiento en toda la planta de 33179 m³.

Todos los cálculos se realizarán con datos del año 2019.

Para iniciar, se plantea un balance de masa general, definido por la ecuación (1).

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} \quad (1)$$

En este caso, se pueden tener tres escenarios:

1. Sí lo que entra al proceso es igual a lo que sale del proceso, no hay acumulación; este escenario sería ideal.
2. Sí lo que entra al proceso es mayor a lo que sale del proceso, hay acumulación; este escenario representa una situación normal.
3. Sí lo que entra al proceso es menor a lo que sale del proceso; este sería un escenario anormal.

Sin embargo, en este tipo de procesos, el escenario 3 puede ser posible siempre y cuando la suma de lo que entra al proceso y la capacidad total de la planta sea mayor a lo que sale del proceso.

Datos:

- Densidad vinaza = 1098 ton/m³
- Porcentaje de sólidos a la entrada del proceso = 24%
- Porcentaje de sólidos a la salida del proceso = 21%

Ahora, se definirán las entradas y las salidas del proceso, mediante las ecuaciones (2) y (3).

$$\text{Entradas} = \text{Producción destilería} + \text{Lixiviados} \quad (2)$$

$$\text{Entradas} = (188540 + 22484,49) \frac{\text{ton}}{\text{año}} = 211024,49 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

$$211024,49 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * 1,098 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 526,55 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Entradas} = 526,55 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Salidas} = \text{Consumo planta} + \text{Campo} + \text{Clientes} \quad (3)$$

Donde:

$$\text{Consumo planta} = \text{Vinaza} + \text{Lodos} \quad (4)$$

$$\text{Campo} = \text{Incavin} + \text{Contratistas} \quad (5)$$

Y a su vez,

$$\text{Vinaza} = \text{Pilas proceso} + \text{Pilas material carbonado} \quad (6)$$

En la tabla 4, se muestran los datos que serán reemplazados en las ecuaciones (3), (4), (5) y (6).

Tabla 4. Datos de salidas del proceso.

Salidas (ton/año)	
Pilas proceso	869
Pilas material carbonado	61177
Lodos	8666
Incavin	38843
Contratistas	66629
Clientes	10895

- Reemplazando los respectivos datos en la ecuación (6), se tiene que:
 $\text{Vinaza} = 62046 \text{ ton/año}$.
- Reemplazando el resultado de la ecuación (6) en la ecuación (4), se tiene que:
 $\text{Consumo planta} = 70712 \text{ ton/año}$.
- Reemplazando los respectivos datos en la ecuación (5), se tiene que
 $\text{Campo} = 105472 \text{ ton/año}$.

Finalmente, reemplazando los resultados obtenidos en la ecuación (3), se tiene:

$$\text{Salidas} = (70712 + 105472 + 10895) \frac{\text{ton}}{\text{año}} = 187079 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

$$187079 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * 1,098 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 466,80 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Salidas} = 466,80 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Luego, se asume un 50% de capacidad en la laguna 1, 2 o 3. Así, la capacidad de la laguna es $3196,50 \text{ m}^3$. Como se sabe cuál es el porcentaje de sólidos tanto a la entrada como a la salida del proceso, se calcula el porcentaje de sólidos y líquidos con los resultados obtenidos por medio de las ecuaciones (2) y (3). Con los resultados obtenidos y aplicando la ecuación (1), se calcula la cantidad de sólidos que se acumula en la laguna.

Finalmente, se calcula el tiempo de retención hidráulico (THR) definido por la ecuación (7).

$$\text{THR} = \frac{\text{Capacidad laguna al 50\%}}{\text{Acumulación sólidos}} \quad (7)$$

En la tabla 5, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5. Acumulación y THR de sólidos.

Entrada (m³/día)		Salida (m³/día)	
Líquido	400,18	Líquido	368,77
Sólido	126,37	Sólido	98,03
Acumulación sólidos (m³/día)		28,34	
THR (días)		112,78	

De los resultados mostrados en la tabla 5, se tiene que al cabo de 113 días la laguna de almacenamiento se va a colmar de sólidos y, por tanto, en el día 114 debería iniciarse el mantenimiento de la misma.

Ahora, se evaluará el costo que tiene hacer el mantenimiento de las lagunas mediante el mecanismo convencional (con cargador y vagón auto volteo) y mediante el método propuesto (con bomba de desplazamiento positivo).

➤ **Mecanismo convencional:**

Datos:

- 4 paladas de cargador, equivalen a 1 viaje de vagón auto volteo
- Volumen pala cargador = 4,80 m³
- Volumen vagón auto volteo = 19,20 m³
- Precio cargador = 120.000 \$/h*
- Precio vagón auto volteo = 60.000 \$/h*

*El precio del cargador y del vagón auto volteo incluyen operario y combustible.

Para conocer cuántos viajes se necesitan para retirar los sólidos de la laguna con un 50% de capacidad, se emplea la ecuación (8).

$$\text{Número total viajes} = \frac{\text{Capacidad laguna al 50\%}}{\text{Volumen vagón auto volteo}} \quad (8)$$

$$\text{Número total viajes} = \frac{3196,5 \text{ m}^3}{19,20 \text{ m}^3} = 166,48 \text{ viajes}$$

De la ecuación (8), se tiene que con 166 viajes se retiran 3196,50 m³ de sólidos de la laguna.

Se sabe que, en un turno de trabajo de 8 horas, se hacen aproximadamente 10 viajes. Para conocer cuántos viajes se hacen en 1 hora, basta con dividir los 10 viajes entre las 8 horas mencionadas.

$$\frac{10 \text{ viajes}}{8 \text{ horas}} = 1,25 \frac{\text{viajes}}{\text{hora}} = 1 \frac{\text{viaje}}{\text{hora}}$$

Luego, para conocer el total de horas que se requieren para retirar los sólidos de la laguna, se divide el número total de viajes entre la cantidad de viajes que se realizan en 1 hora.

$$\frac{166 \text{ viajes}}{1 \frac{\text{viaje}}{\text{hora}}} = 166 \text{ horas}$$

Así, en turnos de trabajo de 8 horas, se requerirán 166 horas (21 días) para remover 3196,50 m³ de sólidos de una laguna de mantenimiento al 50% de capacidad.

Por último, se multiplica el precio de cada máquina por la cantidad de horas requeridas; así, se conoce el valor que tiene emplearlas para hacer el mantenimiento de la laguna y el costo total del mantenimiento de una laguna al 50% de capacidad en un tiempo de 21 días. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Costo total del mantenimiento de una laguna de almacenamiento.

COSTO MECANISMO CONVENCIONAL	
Cargador	\$ 19.920.000
Vagón auto volteo	\$ 9.960.000
Total	\$ 29.880.000

Con el costo total obtenido, se calcula el valor que tiene remover 1 m³ de lodo de la laguna. Para ello, se divide el costo total entre la capacidad de la laguna al 50%.

$$\frac{\$ 29.880.000}{3196,5 \text{ m}^3} = 9.348 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Así, remover de la laguna 1 m³ de lodo con el mecanismo convencional, tiene un costo aproximado de **\$9.350**.

Como el cargador es un equipo tan grande y pesado, al este ingresar a la laguna se pueden ocasionar daños en la geomembrana que la compone. Como es un riesgo que debe considerarse, a continuación se muestra el costo que tendría cambiarla en caso de deteriorarse o dañarse.

Datos:

- Área laguna = 3.902 m²
- Precio geomembrana = 6,00 USD/m² = 24.000 \$/m² (asumiendo un precio para el dólar de \$4.000)
- Precio geotextil = 2.400 \$/m²
- Precio fondos (arcilla y balastro) = 10.000.000 \$/laguna
- Mano de obra = 30% del valor de la obra

En la tabla 7, se muestra el valor de cada material y el costo total que conllevaría la reparación total de la laguna.

Tabla 7. Costo total de reparación de una laguna de almacenamiento.

Costo reparación laguna

Geomembrana	\$ 93.648.000
Geotextil	\$ 9.364.800
Fondos	\$ 10.000.000
Valor obra	\$ 113.012.800
Mano de obra	\$ 33.903.840
Total	\$ 146.916.640

➤ **Mecanismo propuesto:**

Con el mecanismo propuesto, se busca retirar los sólidos de la laguna por medio de una bomba de desplazamiento positivo. Para iniciar los cálculos, se tiene que el caudal de la bomba es 20 m³/h.

Para conocer el tiempo que tomaría retirar el total de lodos de una laguna, basta con dividir su capacidad al 50% entre el caudal de la bomba.

$$\frac{3196,5 \text{ m}^3}{20 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}} = 159,82 \text{ horas}$$

Así, se requerirán 160 horas para remover 3196,50 m³ de sólidos de una laguna de mantenimiento al 50% de capacidad. Traduciéndolo a turnos de 8 horas de trabajo, se requerirían 20 turnos; es decir, que en 20 días se removería el volumen de sólidos ya mencionado.

Durante este proceso, será necesario que un operario se encargue de la bomba. Para ello, se tiene que el salario base de un operario destinado para esta labor es de \$1.386.360.

Con base en eso, se calcula el valor de mano de obra requerida para remover 1 m³ de lodo de la laguna. Para ello, se divide el salario integral entre la capacidad de la laguna al 50%.

$$\frac{\$ 1.386.360}{3196,5 \text{ m}^3} = 433,71 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Así, remover de la laguna 1 m³ de lodo tiene un costo de mano de obra aproximado de **\$434**.

Ahora, se plantean dos posibles escenarios:

1. La energía eléctrica que genera el ingenio es para su propio consumo. En ese sentido, se asume que la energía eléctrica requerida para operar la bomba no tendría costo alguno.

De esta manera, remover de la laguna 1 m³ de lodo con el mecanismo propuesto, tendría un costo total aproximado de **\$434**.

2. Se asume que el ingenio no está produciendo energía eléctrica, por lo que debe usarse la red pública.

En ese sentido, se tiene que el valor de la energía eléctrica es de 342 \$/kWh. Además, se tiene que la potencia de la bomba es 20 HP. Así, el consumo de la bomba es:

$$\text{Consumo bomba} = 1 \text{ kWh} * 20 \text{ HP} = 20 \text{ kWh}$$

Ahora, se calcula el costo que tiene remover con bomba, 1 m³ de lodo, a partir de la ecuación (9).

$$\text{Consumo energía} = \frac{\text{Caudal bomba}}{\text{Consumo bomba}} \quad (9)$$

$$\text{Consumo energía} = \frac{20 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}}{20 \text{ kWh}} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}}$$

Con el valor obtenido para el consumo de energía, se calcula el valor de energía requerida para remover 1 m³ de lodo de la laguna. Para ello, se divide el valor de la energía eléctrica entre el consumo de la misma.

$$\frac{342 \frac{\$}{\text{kWh}}}{1 \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}}} = 342 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Así, remover de la laguna 1 m³ de lodo tiene un costo de energía eléctrica aproximado de **\$350**.

Por último, se suman los valores obtenidos y así, remover de la laguna 1 m³ de lodo con el mecanismo propuesto, bajo el segundo escenario, tiene un costo total aproximado de **\$800**.

- ❖ Adicionalmente, se plantea que para la disposición final de sólidos se va a emplear un vagón auto volteo, como se hace en el mecanismo convencional.

Empleando los valores mencionados anteriormente, se calcula el costo que tendría emplear el vagón auto volteo durante las 160 horas requeridas para el mantenimiento.

$$\text{Costo vagón auto volteo} = 160 \text{ horas} * 60.000 \frac{\$}{\text{h}} = \$ 9.600.000$$

Con el valor obtenido para el vagón auto volteo, se calcula el valor que tendría remover 1 m³ de lodo de la laguna. Para ello, se divide el costo del vagón auto volteo entre la capacidad de la laguna al 50%.

$$\frac{\$ 9.600.000}{3196,5 \text{ m}^3} = 3003,20 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Así, remover de la laguna 1 m³ de lodo con vagón auto volteo tiene un costo aproximado de **\$3.000**.

También, debe considerarse el costo que tendrían los repuestos de la bomba (rotor y estator) en caso de fallar, pues es un riesgo que debe asumirse. El valor de los repuestos, es el 30% del valor total de la bomba; en ese sentido, el costo de los repuestos sería de \$30'000.000.

Finalmente, teniendo en cuenta todo lo mencionado y los resultados obtenidos, se plantearán las posibles formas de ejecutar el mecanismo propuesto y su respectivo costo. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Comparación del costo de los mecanismos de mantenimiento de las lagunas.

MECANISMO CONVENCIONAL	
Costo total (\$/m ³)	9.350
MECANISMO PROPUESTO	
Escenario	Costo total (\$/m³)
Sin energía eléctrica	434
Con energía eléctrica	800
Sin energía eléctrica + Vagón auto volteo	3.434
Con energía eléctrica + Vagón auto volteo	3.800

- **Registro fotográfico**



Figura 2. Montaje experimental y mezclas bagazo-hoja de caña picada a diferentes proporciones



Figura 3. Mezclas bagazo-hoja de caña picada, saturadas.



Figura 4. Mezclas bagazo-hoja de caña picada, sobresaturadas.

• Memorias de cálculo # 2

Para iniciar el planteamiento de cada montaje, se define que cada recipiente contendrá 1500 g de mezcla y su volumen es de 62500 cm^3 (50 cm de ancho, 50 cm de largo y 25 cm de alto). A continuación, se muestran los datos obtenidos para cada caso.

1. Mezcla 50% bagazo – 50% hoja de caña picada:

- Volumen de mezcla = 10000 cm^3 (50 cm de ancho, 50 cm de largo y 4 cm de alto)
- 750 g de bagazo / 750 g de hoja de caña picada
- Volumen de vinaza aplicado = 5500 ml
- Volumen lixiviados = 1360 ml

2. Mezcla 60% bagazo – 40% hoja de caña picada:

- Volumen de mezcla = 10000 cm^3 (50 cm de ancho, 50 cm de largo y 4 cm de alto)
- 900 g de bagazo / 600 g de hoja de caña picada
- Volumen de vinaza aplicado = 6500 ml
- Volumen lixiviados = 1650 ml

3. Mezcla 70% bagazo – 30% hoja de caña picada

- Volumen de mezcla = 10000 cm^3 (50 cm de ancho, 50 cm de largo y 4 cm de alto)
- 1050 g de bagazo / 450 g de hoja de caña picada
- Volumen de vinaza aplicado = 6500 ml
- Volumen lixiviados = 1320 ml

4. 100% bagazo

- Volumen de mezcla = 12500 cm^3 (50 cm de ancho, 50 cm de largo y 5 cm de alto)
- 1500 g de bagazo
- Volumen de vinaza aplicado = 9000 ml
- Volumen lixiviados = 970 ml

Para conocer el volumen real de aplicación o volumen de saturación, se emplea la ecuación (10).

$$\text{Volumen saturación} = \text{Volumen de vinaza aplicado} - \text{Volumen lixiviados} \quad (10)$$

Reemplazando los valores mostrados anteriormente en la ecuación (10), se obtienen los siguientes volúmenes de saturación.

1. $\text{Volumen saturación}_{50/50} = 4140 \text{ ml}$
2. $\text{Volumen saturación}_{60/40} = 4850 \text{ ml}$
3. $\text{Volumen saturación}_{70/30} = 5180 \text{ ml}$
4. $\text{Volumen saturación}_{100} = 8030 \text{ ml}$

Sabiendo que $1 \text{ ml} = 1 \text{ cm}^3$, se encuentra la relación de volúmenes vinaza-mezcla por medio de la ecuación (11).

$$\text{Relación } v/v = \frac{\text{Volumen saturación}}{\text{Volumen de la mezcla}} \quad (11)$$

Reemplazando los valores mostrados anteriormente en la ecuación (11), se obtienen los siguientes resultados.

1. $\text{Relación } v/v_{50/50} = \frac{4140 \text{ cm}^3}{10000 \text{ cm}^3} = 0,41$
2. $\text{Relación } v/v_{60/40} = \frac{4850 \text{ cm}^3}{10000 \text{ cm}^3} = 0,49$
3. $\text{Relación } v/v_{70/30} = \frac{5180 \text{ cm}^3}{10000 \text{ cm}^3} = 0,52$
4. $\text{Relación } v/v_{100} = \frac{8030 \text{ cm}^3}{12500 \text{ cm}^3} = 0,64$

Sabiendo que el montaje realizado experimentalmente equivale a una porción (diferencial) de una pila de material carbonado presente en planta, se encuentran los volúmenes de saturación

teóricos para pilas reales, pero con las mismas proporciones de material aquí planteadas. Para esto es necesario conocer las dimensiones de una pila en planta.

- Base de la pila = 5 m
- Profundidad de la pila = 120 m
- Altura de la pila = 2,3 m

El volumen de la pila se calcula mediante la ecuación (12).

$$\text{Volumen pila} = \left(\frac{\text{base} \cdot \text{altura}}{2} \right) * \text{profundidad} \quad (12)$$

$$\text{Volumen pila} = \left(\frac{5 \text{ m} * 2,3 \text{ m}}{2} \right) * 120 \text{ m} = 690 \text{ m}^3$$

Ahora, se calculan los volúmenes de saturación teóricos para una pila de tamaño real. Esto se hace multiplicando el volumen de la pila por la relación de volumen obtenida. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada proporción planteada.

1. *Volumen aplicación*_{50/50} = 690 m³ * 0,41 = 285,66 m³
2. *Volumen aplicación*_{60/40} = 690 m³ * 0,49 = 334,65 m³
3. *Volumen aplicación*_{70/30} = 690 m³ * 0,52 = 357,42 m³
4. *Volumen aplicación*₁₀₀ = 690 m³ * 0,64 = 443,26 m³

Se sabe que cada módulo de proceso cuenta con ocho pilas. En este caso, se considerarán los dos módulos de saturación de material carbonado; estos dos módulos sumarían entre sí 16 pilas pero se tendrán en cuenta sólo 14 de ellas pues una es de armado y otra es de consumo. Esto se hace con el fin de conocer el volumen total de vinaza que podría aplicarse entre ambos módulos, de acuerdo a cada proporción planteada.

1. *Volumen total aplicación*_{50/50} = 285,66 m³ * 14 = 3999,24 m³
2. *Volumen total aplicación*_{60/40} = 334,65 m³ * 14 = 4685,10 m³
3. *Volumen total aplicación*_{70/30} = 357,42 m³ * 14 = 5003,88 m³
4. *Volumen total aplicación*₁₀₀ = 443,26 m³ * 14 = 6205,58 m³

Finalmente, con base en los valores previamente obtenidos y, teniendo de referencia una pila armada con 100% bagazo, se harán las respectivas diferencias para conocer el volumen de vinaza que se dejaría de aplicar al reincorporar la hoja de caña picada al proceso de compostaje.

1. *Diferencia volumen aplicación*_{50/50} = (6205,58 - 3999,24) m³ = 2206,34 m³
2. *Diferencia volumen aplicación*_{60/40} = (6205,58 - 4685,10) m³ = 1520,48 m³
3. *Diferencia volumen aplicación*_{70/30} = (6205,58 - 5003,88) m³ = 1201,70 m³