

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ABONO A PARTIR DE
EXCRETAS BOVINAS EN LA FINCA EL MIRADOR DE LAS MARÍAS, GUADUAS**

**DIEGO ALEJANDRO CAICEDO DELGADO
LUISA FERNANDA MARTÍNEZ LEÓN**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director:

**Harvey Andrés Milquez Sanabria
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del director

Firma del presidente jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C. agosto de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrectora Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dra. José Luis Macías Rodríguez

Decano de Facultad

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo en primer lugar a mis padres Luis Martínez y Mery León por brindarme su apoyo incondicional en todo momento, porque sin ustedes esto no sería posible. A mi hermana Gina Martínez y mis tres sobrinos por estar siempre presentes apoyándome en los momentos más difíciles y contagiarme siempre de alegría.

En segundo lugar, a mi novio Carlos Franky por ser esa voz de aliento y esperanza que me impulsaba cada vez que aparecía una dificultad en el camino; por enseñarme a disfrutar esta etapa siendo la última de mi carrera.

Finalmente, a mis amigos Eduardo Álvarez y Diego Caicedo por formar parte de este capítulo de mi vida por enseñarme el verdadero valor de la amistad y acompañarme durante toda mi carrera en los momentos más difíciles, por darme ánimo y fortaleza cuando lo necesitaba.

LUISA FERNANDA MARTÍNEZ LEÓN

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Universidad de América por permitirnos formarnos como ingenieros químicos íntegros; de igual manera agradecemos a todos los docentes que compartieron su conocimiento, apoyaron de manera constante nuestro proceso de aprendizaje y guiaron el crecimiento profesional y personal de cada uno de nosotros.

Por otra parte, queremos agradecer a Alejandro Rodríguez propietario de la finca mirador de las Marías, por permitirnos desarrollar nuestra investigación en las instalaciones de su finca, poniendo a nuestra entera disposición los espacios y la información requerida para realizar este proyecto de grado.

Adicionalmente, agradecemos al ingeniero Harvey Andrés Milquez Sanabria director de nuestro proyecto de grado por guiarnos y acompañarnos durante el proceso de desarrollo del proyecto aportando ideas constructivas que permitieron la culminación del mismo. Además de motivarnos a participar en espacios y eventos de investigación en los que pudimos compartir nuestro conocimiento.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	18
1. MARCO TEORICO	19
1.1. Abono	19
<i>1.1.1. Aplicación y uso de los abonos</i>	<i>19</i>
<i>1.1.2. Tipos de abonos</i>	<i>21</i>
1.2. Compostaje	23
<i>1.2.1. Digestión aerobia</i>	<i>25</i>
<i>1.2.2. Tipos de compostaje</i>	<i>26</i>
<i>1.2.3. Factores críticos en el proceso de compostaje</i>	<i>31</i>
1.3. Biodigestión	33
<i>1.3.1. Tipos de biodigestores</i>	<i>34</i>
<i>1.3.2. Digestión anaerobia</i>	<i>41</i>
<i>1.3.3. Parámetros críticos de la digestión anaerobia</i>	<i>45</i>
1.4. Legislación de producción y manejo de abono en Colombia	47
<i>1.4.1. Reglamentación para el manejo de excretas bovinas en Colombia</i>	<i>47</i>
<i>1.4.2. Reglamentación para abonos en Colombia</i>	<i>47</i>
2. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO	49

2.1. Generalidades de la finca	49
2.2. Proceso de recolección de muestras	50
2.2.1. <i>Muestreo del suelo</i>	51
2.2.2. <i>Muestreo del excremento</i>	52
2.2.3. <i>Muestreo del abono</i>	53
2.3. Evaluación de los resultados de los análisis de laboratorio.	54
2.3.1. <i>Interpretación de resultados para muestra de suelo</i>	54
2.3.2. <i>Interpretación de resultados para muestra de abono</i>	57
2.3.3. <i>Interpretación de resultados para muestras de excretas</i>	60
2.4. Descripción de reguladores de la relación C:N	62
3. ANALISIS BIBLIOMÉTRICO	67
3.1. Materiales y métodos	67
3.2. Metodología	68
3.3. Análisis de resultados	69
4. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE ABONO	77
4.1. Identificación de las alternativas de producción de abono.	78
4.2. Identificación de los criterios de evaluación.	83
4.3. Diseño y estructuración de la encuesta basado en los criterios.	87
4.4. Tabulación de los resultados de las encuestas.	88
4.5. Matriz multicriterio	92
4.5.1. <i>Análisis para establecer los niveles relativos de comparación</i>	93
4.5.2. <i>Elaboración de matrices multicriterio</i>	98
4.5.3. <i>Interpretación de los resultados</i>	99
5.ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS	102

5.1. Estimación de la cantidad de excretas generadas	102
5.2. Identificación de las entradas y salidas	104
5.3. Dimensionamiento de sistema de producción	105
5.3.1. <i>Estimación de las cantidades de materia prima</i>	105
5.3.2. <i>Sistema de producción establecido</i>	108
5.4. Determinación de parámetros técnicos de operación	111
6. DETERMINACIÓN DEL COSTO DE IMPLEMENTACIÓN	113
7. BIODIGESTOR A ESCALA LABORATORIO	120
7.1. Materiales y métodos	120
7.1.1. <i>Adaptación del tanque</i>	121
7.1.2. <i>Montaje del sistema de digestión</i>	122
7.1.3. <i>Seguimiento del proceso de digestión</i>	123
7.2. Resultados	125
8. CONCLUSIONES	131
BIBLIOGRAFÍA	133

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Rendimientos de cultivos en los EEUU, 1930 a 1998	20
Figura 2. Profundidad de las raíces de las plantas con y sin fertilización	21
Figura 3. Proceso del compostaje	25
Figura 4. Hilera de compostaje con aeración pasiva	30
Figura 5. Suministro de aire para el sistema de compostaje.	31
Figura 6. Reactores batch de laboratorio	35
Figura 7 Biodigestor taiwanés	37
Figura 8. Biodigestor chino	39
Figura 9. Biodigestor hindú	40
Figura 10. Fases de la digestión anaerobia	42
Figura 11. Establo mirador de las marías	49
Figura 12. Pila no cónica	50
Figura 13. Bultos de abono empacados	54
Figura 14 Metodología de análisis Bibliométrico	68
Figura 15 Producción científica anual	71
Figura 16 Fuentes más relevantes	72
Figura 17 Nube de palabras claves	73
Figura 18. Proceso de jerarquía analítica (AHP)	78
Figura 19 Mapa de sismicidad	80
Figura 20 Organización jerárquica de los criterios	84
Figura 21 Diseño de pregunta para la encuesta	88
Figura 22 Tabulación de resultados primera pregunta	89

Figura 23	Comparación de criterios	100
Figura 24	Nivel de importancia de los criterios	101
Figura 25	Resultados de la matriz de selección	101
Figura 26	Bascula XTEEL W II	103
Figura 27	Diagrama de Gantt del proceso	109
Figura 28	Cálculo de liquidación para empleador	119
Figura 29	Sistema de agitación del tanque	122
Figura 30	Hongo superficial	125

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Métodos especializados de compostaje en tanques	29
Tabla 2. Resultados de análisis para el suelo	55
Tabla 3. Resultado de análisis del abono	58
Tabla 4. Resultados fisicoquímicos de las excretas	61
Tabla 5 Resultados de análisis microbiológico de excretas	62
Tabla 6 Relación C: N de algunos materiales	63
Tabla 7 Relación C: N de los reguladores propuestos	65
Tabla 8 Información principal de la bibliometría	70
Tabla 9 Producción por países	74
Tabla 10 Resumen de resultados generales de las ecuaciones de búsqueda	75
Tabla 11 Ventajas y desventajas del proceso de compostaje por hileras	81
Tabla 12. Ventajas y desventajas del proceso de Vermicompost	82
Tabla 13. Ventajas y desventajas reactor batch	82
Tabla 14 Ventajas y desventajas reactor Taiwanés	83
Tabla 15 Niveles de importancia	88
Tabla 16 Definición de los valores de importancia	89
Tabla 17 Resultados de la tabulación	90
Tabla 18 Niveles relativos de comparación	93
Tabla 19 Ajuste de las ponderaciones según la desviación	98
Tabla 20 Resultados de las mediciones	104
Tabla 21 Entradas y salidas del sistema	105
Tabla 22 Costos de reguladores C: N	106

Tabla 23	Balance de materia para la base de cálculo	108
Tabla 24	Balance de materia para cada uno de los tanques anaerobios	109
Tabla 25	Costos de los materiales para la construcción de la estructura	114
Tabla 26	Cotización de equipos y accesorios de acondicionamiento	115
Tabla 27	Instrumentos de medición y elementos para manipulación de materias primas	116
Tabla 28	Gastos operacionales	118
Tabla 29	Lecturas de pH y temperatura	123
Tabla 30	Comparación del biosol contra el abono orgánico producido actualmente	126
Tabla 31	Propiedades del Biol obtenido comparado con otras investigaciones	128

ABREVIATURAS

ICA: Instituto Colombiano Agropecuario.

AHP: Hierarchical Analytical Process, que en español significa proceso analítico jerárquico.

FAO: Food and Agriculture Organization.

ONUAA: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

dS: deci-Siemens unidad derivada para la conductividad eléctrica.

NA: No Aplica.

ND: No Detectable.

cmol: centi-mol.

NTC: Norma Técnica Colombiana.

RESUMEN

Este trabajo se realizó con el fin de encontrar un método de producción de abono a partir de las excretas bovinas, generadas durante el proceso de ceba en la producción de ganado para sacrificio y consumo en la finca Mirador de las Marías ubicada en la vereda de Aguas claras en Guaduas. Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica en la que se identificaron los métodos de producción de abono, biodigestión y compostaje, con sus diferentes mecanismos de operación. Luego se llevó a cabo una caracterización del proceso de disposición actual, identificando que método de producción se utiliza y analizando las características fisicoquímicas de la materia prima y del producto terminado.

Por otra parte, con ayuda de la plataforma Scopus y el software bibliometrix se desarrolló un análisis bibliométrico para el cual se establecieron cinco ecuaciones de búsqueda con las que se estudió el comportamiento de diferentes índices de producción científica en un periodo de 20 años. Para la selección del método de producción de abono se utilizó el proceso analítico jerárquico AHP, en que se establecieron seis criterios de evaluación y cuatro alternativas dando como resultado una preferencia sobre la alternativa de biodigestión tipo batch, seguida por el compostaje en pilas pequeñas.

Luego de seleccionar el método de producción, se estimó la cantidad de excretas generadas en un mes obteniendo un aproximado de 5,25 ton/mes; a partir de esto se realizó el dimensionamiento de un sistema conformado por seis tanques de 2000 L; un balance de masa considerando las cantidades de los reguladores de relación carbono nitrógeno seleccionados; adicionalmente, se establecieron los parámetros técnicos de operación. Considerando el dimensionamiento se determinaron los costos de implementación relacionados a construcción y adecuación de instalaciones, equipos, instrumentación y utilería. Finalmente, se construyó un biodigestor a escala laboratorio y se analizaron las características fisicoquímicas de los productos obtenidos en una corrida.

Palabras clave: Excretas bovinas, biodigestión, compostaje, abono, biol, biosol.

INTRODUCCIÓN

En Colombia “la ganadería contribuye con el 1,4% del PIB nacional y aporta el 21,8% del PIB agropecuario esto debido a un aumento en el consumo per cápita de leche y carne llegando a un valor de 156 L/año y 17,1 kg/año respectivamente.”[1] En el mercado ganadero colombiano aproximadamente 5,76 millones de cabezas corresponden al hato de ceba para producción de carne y subproductos. El sector agrícola ha presentado un crecimiento proporcional al aumento de la población debido a que se dispara la demanda de alimentos; que en gran parte son de origen animal y provienen de algún subsector de la ganadería.

La finca Mirador de las Marías ubicada en la vereda de Aguas claras en Guaduas Cundinamarca, se dedica a la producción de ganado de engorde para sacrificio y consumo; actualmente se manejan 16 cabezas de ganado criollo alimentadas mediante el mecanismo de pastoreo y establo, permaneciendo 9 horas del día en el establo con una dieta de pollinaza sanitizada, melaza y urea; mientras las horas restantes son llevados a los potreros o mangones. Durante el proceso de ceba se genera un estimado de 175,09 kg de excretas al interior de los establos; estos se utilizan para producir abono por medio de compostaje a cielo abierto, colocando pilas en contacto directo con el suelo, ocasionando contaminación por “acumulación de micro y macro nutrientes en el suelo y en los cuerpos hídricos superficiales”[2] y la proliferación de plagas como moscas y ratas que afectan las buenas prácticas de producción agrícola.

La producción de abono orgánico es una práctica que consiste en el aprovechamiento de los residuos agroindustriales que son sometidos a un proceso de digestión anaerobio o aerobio que da como producto un fertilizante rico en macro y micro nutrientes. Se pueden implementar diversas tecnologías o mecanismos para la fabricación de este suministro agrícola que se puede obtener a precios bajos comparado fertilizantes químicos de alto costo. Sin embargo, existen diversos mecanismos de obtención de abono a partir de excretas bovinas los cuales se diferencian entre si según el tipo de digestión, el grado de tecnificación y el tipo de alimentación, es decir, si es continua o por lotes.

Este proyecto busca evaluar los métodos de obtención de abono a partir de excretas bovinas, con el fin de seleccionar el método que se ajuste de la mejor manera a los requerimientos de la finca Mirador de las Marías. Para ello, se llevó a cabo una revisión teórica que permitió conocer los métodos de producción de abono orgánico; posteriormente se realizó una visita en la que se recolectaron muestras de abono, excretas y suelo las cuales fueron enviadas para análisis en laboratorios contratados por los investigadores. Los muestreos se realizaron siguiendo las guías emitidas por cada uno de los laboratorios. Por otra parte, la interpretación de los resultados de la muestra de abono se efectuó tomando como referencia los valores establecidos en la NTC 5167; mientras los resultados de la muestra de suelo se examinaron teniendo en cuenta los valores de fertilización para diversos cultivos expuestos en la quinta aproximación del ICA, con estos resultados se evidenció la contaminación del suelo por sobrecarga de nutrientes mayores y menores como el calcio, el zinc y el boro; razón por la cual el terreno no es apto para el desarrollo de plantas como maíz, frijol y tomate.

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, se realizó un proceso de jerarquía analítica en el que se eligieron cuatro alternativas que fueran aplicables en la finca, considerando factores como la geografía del terreno; durante este proceso se seleccionaron cuatro criterios que se utilizaron en matrices de selección de las alternativas. Luego de elegir la alternativa de producción se dimensionó el sistema de producción realizando un balance de masa que permitiera conocer las cantidades de materia prima que se manejarían en durante la fabricación del abono. De este modo, se establecieron los parámetros técnicos de operación tomando como base las características de desarrollo de los microorganismos presentes en la biodigestión anaerobia. Por otra parte, se desarrolló la estimación de los costos de implementación del sistema, realizando cotizaciones en diferentes establecimientos locales con el fin de evitar el costo de transporte. Finalmente, se hizo un ensayo a escala piloto en el que se tomó como referencia el balance de masa de la base de cálculo establecida por los investigadores, se llevó a cabo una sola corrida durante veinte días y realizo la caracterización de los productos obtenidos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar los métodos y técnicas de obtención de abono a partir de excretas bovinas en la finca el mirador de las marías, guaduas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el proceso de disposición actual de las excretas generadas en los establos.
- Seleccionar la alternativa para el aprovechamiento de los residuos.
- Especificar los requerimientos técnicos que presenta la alternativa seleccionada de producción de abono.
- Determinar el costo de implementación del método de producción de abono seleccionado.

1. MARCO TEORICO

1.1. Abono

En el sector agrícola el suelo es la parte fundamental para el desarrollo sostenible del sector; debido a que el aprovechamiento depende de la fertilidad y la disponibilidad de materia orgánica del mismo. En suelos poco fértiles o con baja disponibilidad de materia orgánica se debe realizar un proceso de acondicionamiento en el cual se aplican abonos orgánicos y químicos para enriquecer el suelo con los macronutrientes y micronutrientes que necesitan las plantas que se van a cultivar en el terreno.

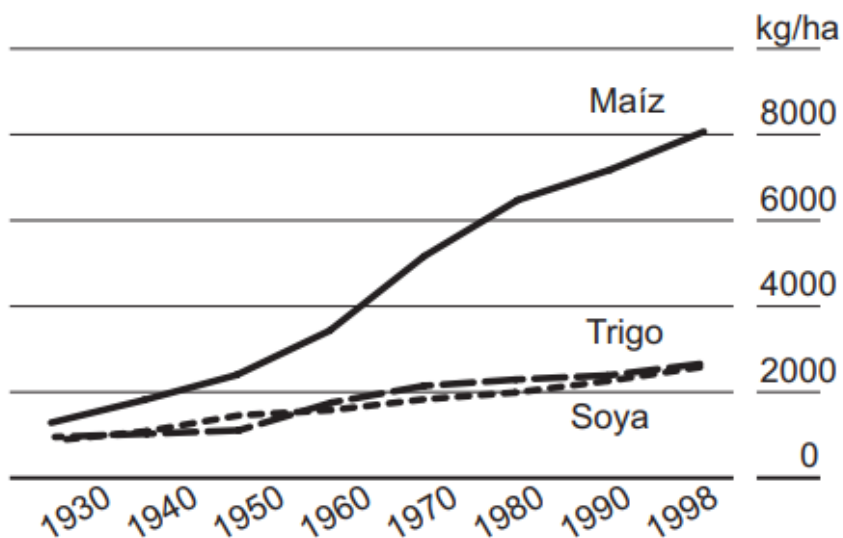
Según el código internacional de conducta para el uso y manejo de fertilizantes, un abono o fertilizante, “es una sustancia química o natural utilizada para aportar nutrientes a las plantas” [3]. Este suministro agrícola usualmente se aplica directamente en el suelo, aunque los abonos líquidos se pueden rociar sobre los follajes con mecanismos de aspersión o se pueden diluir en medios hidropónicos de cultivo. “La adición de estos productos agiliza el crecimiento en las plantas y aumenta el rendimiento mejorando la calidad de los cultivos” [4].

1.1.1. Aplicación y uso de los abonos

En la década de los noventa se presentó un crecimiento poblacional acelerado generando un problema de desabastecimiento de los productos provenientes del sector agricultor, estos debido a que la demanda aumento hasta en un 90% y los rendimientos de los cultivos no eran suficientes para suplirla [5]. Por tal motivo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA) creó proyectos de investigación como el programa de fertilización que logró obtener un aumento en los rendimientos de hasta el 60% de tres cultivos en estudio como se muestra en la figura 1, esto con el fin de dar una solución a la problemática anteriormente mencionada.

Figura 1.

Rendimientos de cultivos en los EEUU, 1930 a 1998



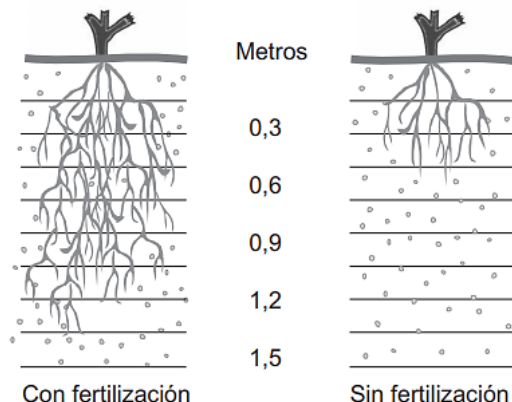
Nota: Crecimiento en la producción de cultivos luego de un periodo de uso de fertilizantes sobre el suelo. Tomado de: FAO, Los fertilizantes y su uso. 2002.

Otras características analizadas por la organización de las naciones unidas para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA) durante la aplicación de abonos son la eficiencia de los mismos y la respuesta las plantas; lo que les permitió establecer que “la aplicación fertilizantes permite asegurar el uso eficaz de la tierra y especialmente del agua, puesto que ayuda a que las raíces de la planta aumenten la profundidad garantizando de este modo la disponibilidad de agua y nutrientes en periodos de sequía” [5]. Como se muestra en la figura 2 el crecimiento y profundización de las raíces según su ambiente, sea con fertilizante o en ausencia de este.

Figura 2.

Profundidad de las raíces de las plantas con y sin fertilización

En suelos de baja fertilidad, los fertilizantes aumentarán la profundidad a la cual las raíces crecen.



Nota: Muestra de cómo la fertilización hace crecer más hacia abajo las raíces. Tomado de: FAO *Los fertilizantes y su uso*. 2002.

A partir de investigaciones como esta fue posible establecer los usos de los abonos y los mecanismos de aplicación de estos. Los fertilizantes son utilizados como suministro de nutrientes en suelos con baja fertilidad, como mejoradores del rendimiento aumentando la calidad de los productos y la regeneración de suelos sobreexplotados. Por otra parte, los fertilizantes son utilizados en ecosistemas con afectaciones graves para remediar suelos favoreciendo la aparición de microorganismos que cumplen la labor de enmendar el terreno aportando los nutrientes de los cuales carece el medio o disminuyendo la concentración de metales pesados y otros compuestos que limitan el desarrollo normal del ecosistema.

1.1.2. Tipos de abonos

Los abonos se pueden clasificar en dos grupos; químicos y orgánicos, que se diferencian entre sí por sus procesos de producción y las materias primas empleadas para la elaboración de cada uno de ellos, a continuación, se describe cada uno de estos con sus subtipos más repetitivos.

1.1.2.a. Abono orgánico. Los abonos orgánicos son sustancias que están constituidas por desechos de origen animal, vegetal o mixto que se añaden al suelo con el objetivo de mejorar sus características físicas, biológicas y químicas [6]; estos son usados usualmente para remediar los suelos cuando terminan un periodo largo de cosecha, debido a que se generan carencias de materia orgánica.

La materia prima para este tipo de abono consiste en residuos de diferentes campos como los excrementos de la industria agropecuaria de animales como vacas, equinos, conejos, gallinas, ovino y porcinos; restos orgánicos de procesos agrícolas tales como cáscaras, semillas y pulpa; desechos domésticos en el que se asocia la basura orgánica o de fácil degradación con fuente de carbono como papel y cartón.

Los beneficios ofrecidos por los abonos orgánicos son abundantes, entre ellos se destacan “mejorar la actividad biológica del suelo, especialmente con aquellos organismos que convierten la materia orgánica en nutrientes disponibles para los cultivos; mejora la capacidad de intercambio catiónico del suelo; facilita la labranza de suelos y son amigables con el medio ambiente.”[7]

A continuación, se realiza una breve descripción de los abonos orgánicos más comunes en el sector agroindustrial:

- Compost: es un tipo de fertilizante elaborado a partir de material orgánico generalmente mixto, se puede realizar por diferentes mecanismos dependiendo del grado de tecnificación y la cantidad de residuos que se desean integrar al proceso. Cuando el fertilizante tiene un alto contenido de nutrientes se preparan disoluciones de compost con agua a lo que se denomina Té de compost.
- Biol: es un tipo de fertilizante que en la mayoría de los casos se obtienen por un proceso de fermentación anaerobio llamado biodigestión húmeda. “El biol como abono es una fuente de fitorreguladores que ayudan a las plantas a tener un óptimo desarrollo, generando mayor productividad a los cultivos”. [8]
- Bochasi: Es un fertilizante que se produce por medio de un proceso fermentativo de compostaje, en este se emplean materiales orgánicos mixtos y sustratos que aceleran el proceso, dando como resultado un abono rico en micronutrientes y microbiota [9]. Este tipo de abono suele usarse en soluciones con agua a las que se les conoce como Té de bochasi.

- Humus de lombriz: Este tipo de abono orgánico se obtiene a partir de la transformación de materia orgánica de origen animal, vegetal o mixta utilizando lombrices que lo ingieren para producir un compost rico en nutrientes y microorganismos llamado humus.

1.1.2.b. Abono químico. Los abonos químicos son manufacturados a partir de una materia prima seleccionada que le provee características especiales al suelo, satisfaciendo las necesidades o requerimientos de la especie vegetal que se desea cultivar. Estos productos tienen un proceso de elaboración complejo que debe ser desarrollado siguiendo regulaciones referentes al manejo y disposición de sustancias químicas inorgánicas, buenas prácticas de manufactura. Además, se deben establecer controles en proceso estrictos debido al alto grado de tecnificación que tienen los equipos y las instalaciones donde se fabrican este tipo de abonos.

El costo de los abonos químicos es alto y variable, debido a que las materias primas son importadas o de difícil adquisición haciendo que el costo de producto se dependiente de la moneda de cambio, los aranceles y los seguros de transporte de los insumos [10].

Los fertilizantes químicos pueden encontrarse de forma sólida como perlas, gránulos, cristales y en polvo; también se pueden adquirir en forma líquida que son empleados en cultivos que cuentan con sistemas de aspersión; suelen venir empacados en forma de suspensión, para ser diluidos antes de la aplicación [11].

Se pueden encontrar dos clasificaciones dentro de los fertilizantes químicos; estos pueden ser simples, es decir, que contienen solo uno de los tres macronutrientes primarios (nitrógeno, fósforo y potasio); o los fertilizantes compuestos que se caracterizan por tener más de un elemento. Los siguientes son abonos simples típicos en la industria agrícola:

- Nitrogenados: urea, sulfato amónico, nitrato amónico y nitrato de calcio.
- Fosfatados: superfosfato simple, superfosfato triple y roca fosfórica.
- Potasas: cloruro de potasio y sulfato de potasio.

1.2. Compostaje

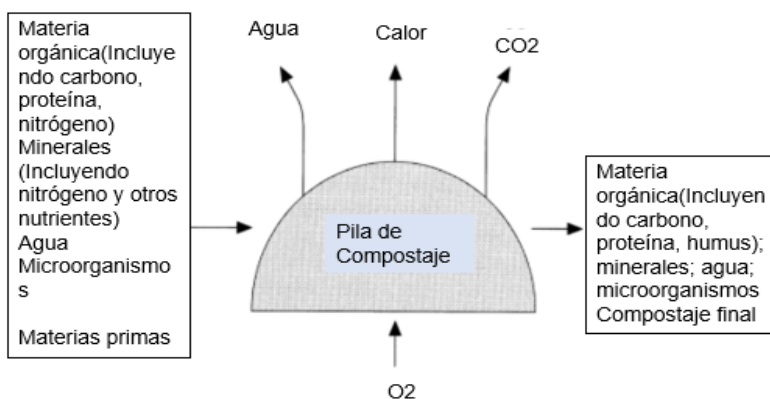
El compostaje es un proceso biológico donde de forma natural los microorganismos transforman aeróbicamente los compuestos de materiales aprovechables como por ejemplo los

residuos agroindustriales, excrementos, conjunto de hojas u otro tipo de materia orgánica que permita el metabolismo de los hongos y bacterias para llevar así el proceso de descomposición.

En la figura 3 se tiene un resumen de la acción microbiológica sobre la materia orgánica que poseerá para este mecanismo una cantidad útil de carbono, proteínas, nitrógeno, otros micro y macro compuestos necesarios para la acción enzimática. Los microorganismos consumen oxígeno (O_2) mientras se alimentan de la materia orgánica como en la figura 3. El compostaje activo genera un considerable calor y una gran cantidad de dióxido de carbono (CO_2) y agua en fase de vapor liberada en el aire. Las pérdidas de agua y dióxido de carbono (CO_2) pueden corresponder a la mitad en peso de la materia inicial. Como producto final se adquiere una menor cantidad de masa a la inicial de un aproximado al 50% o menos; al igual que la materia orgánica se presenta una disminución de los micro y macro nutrientes, además en el abono producido se presenta una fase coloidal que es el humus rico en componentes estables por lo que hace del elemento obtenido ideal para fertilizar el suelo [12].

Figura 3.

Proceso del compostaje



Nota: Balance de masa conceptual del proceso de compostaje.
Tomado de: R. Rynk et al., *On-Farm Composting Handbook*,
vol. 2. 2018.

1.2.1. Digestión aerobia

La digestión aerobia es un proceso que se caracteriza por ser desarrollado por microorganismos como bacterias y protozoos que generalmente son estrictamente aerobios. Estos organismos transforman la materia orgánica en productos finales ricos en nutrientes, esto gracias a la intervención de las enzimas que permiten la metabolización de los carbohidratos, lípidos, proteínas y amino ácidos presentes en la materia orgánica.

La digestión aerobia consta de cuatro (4) etapas en las cuales se debe asegurar la disponibilidad de oxígeno por medio de la aireación constante, esto con el fin de garantizar la respiración de los microorganismos encargados de degradar el material orgánico a través de múltiples reacciones de oxidación, catalizadas por enzimas que se producen durante el proceso de respiración del microbio.

La primera fase es llamada mesófila debido a que el proceso inicia a temperatura ambiente y aumenta gradualmente según la actividad microbiana hasta alcanzar los 40°C; en esta etapa los microorganismos toman como sustrato los azúcares y el material soluble para transformarlos en ácidos orgánicos generando un descenso de pH; el tiempo de duración de esta fase puede variar dependiendo de la temperatura ambiente del lugar en el que se está realizando el proceso. Una vez

culminada la fase mesófila, inicia la fase termófila o de higienización en la cual intervienen bacterias con una mayor resistencia a la temperatura pues se pueden alcanzar los 60°C; en este proceso las bacterias descomponen las fuentes complejas de carbono como la celulosa y la lignina [13], además convierten el nitrógeno disponible en amoníaco llevando el pH de ácido a alcalino. Posteriormente, se genera la fase de enfriamiento, la cual inicia cuando los sustratos están prácticamente agotados provocando un descenso de temperatura y de pH llegando a un valor cercano a la neutralidad, pero con tendencia a la alcalinidad; esta fase se caracteriza porque durante esta aparecen unos hongos que indican el comienzo de esta etapa. Finalmente, se produce una fase de maduración que es considerada como la etapa más larga del proceso de digestión aerobia, en ella tienen lugar un conjunto de reacciones en las cuales se forman ácidos húmicos y fúlvicos [13].

1.2.2. Tipos de compostaje

La derivación de los tipos de compostaje viene dada por el ciclo metabólico de los cuerpos que compostan la materia o precisamente de los procedimientos que llevan a obtener la materia orgánica al final.

1.2. 2.a. Vermicompost. El vermicompost o lombricomposta consiste en la degradación de la materia a través del metabolismo de lombrices de tierra. El vermicompost es un proceso que ayuda a eliminar elementos tóxicos y convertirlos en una materia de alto grado, rico en nutrientes y un muy significativo bio fertilizante y condicionador de suelo [14]. Dentro de la multitud de especies de lombrices para el uso de este proceso las útiles son las que provienen de la India de las cuales las más destacables son; *Lampito mauritii*, *Dichogaster boloui* y *Drawida Willsi I*.

El proceso dentro del cual la lombriz se expone durante el tiempo de vermicompost de los desechos es física y bioquímica [15]. La actividad física se da en el aire que pasa a través del sustrato y de la mezcla, por otro lado, está el procedimiento bioquímico que se ve en la descomposición dada por el metabolismo de la lombriz produciendo como resultado un compostaje de sustancias húmicas ideales para la remediación del suelo y para la fertilidad de este por ser una gran fuente de carbono y de otros nutrientes obtenidos a partir del metabolismo microbiano.

Dada la información proporcionada por el documento con referencia [15], se pueden concluir ciertas características ideales para que los gusanos de tierra trabajen y metabolicen los desechos de una manera correcta y no se vean inhibidos por algún aspecto en la materia prima o en el lecho en el que van a permanecer. Las lombrices pueden realizar su proceso de digestión de materias con un pH del rango de 5 a 8, con un contenido de humedad entre 40% a 55% y que tengan una relación entre carbono y nitrógeno inicial ideal de 30. Dadas estas condiciones se determinan unas enmiendas que ayudan a que los residuos sean más apetecibles para los gusanos de tierra. Dentro de las enmiendas se encuentra como materia prima el excremento de vaca, los residuos agrícolas de frutas y verduras, también se puede usar materia que ayude a reducir la humedad de los cuerpos que se van a usar para el vermicompost.

El proceso de vermicompost no involucra una etapa termofílica. Sin embargo, estudios limitados mostraron que el vermicompost podría reducir los patógenos en el desperdicio [15]. Los autores de la referencia [16], realizaron una investigación donde lograron concluir que luego de la maduración del vermicompost a partir de heces humanas carecía totalmente de patógenos, planteando de esta manera la posibilidad de que, con la actividad enzimática por parte del sistema digestivo de las lombrices se logra eliminar estos microorganismos perjudiciales.

Algunas condiciones complicadas de mantener en este tipo de compostaje es cumplir con las bajas temperaturas requeridas para mantener en condiciones óptimas el hábitat de las lombrices.

1.2.2.b. Compostaje pasivo en pilas. Alto nitrógeno y bajo carbono, exceso de humedad que evitan la existencia de una estructura de poros en la materia para esto se debe tener un material de lecho, en ausencia del aire los microorganismos anaerobios dominarán la degradación. El proceso anaerobio conlleva una descomposición lenta con bajas temperaturas y a su vez propagación de malos olores por la liberación de sulfuro de hidrógeno y otros compuestos. Estos olores se dispersan rápidamente cuando se quiebra la capa superior de la pila que por el flujo de aire en el ambiente hace que se forme una cubierta que los retiene; además de mantener los olores la humedad es otra propiedad que permanece durante el proceso, debido al nulo cruce de aire a través de la pila, produciendo lixiviados que afectan el suelo y en algunos casos las fuentes hídricas.

Este proceso es la introducción al avance de las demás tecnologías respecto a mantener la etapa aeróbica estable. Dentro de este proceso se hizo un complemento que fue el agregar un lecho el

cual sirva para mantener espacios dentro de la materia para que haya paso de aire, esto resolviendo el aspecto de la humedad y lixiviados de la pila.

Las pilas de excremento de esta naturaleza no se podrán descomponer satisfactoriamente si estas no tienen un correcto tamaño y manejo. El manejo apropiado de estos incluye asegurar que la mezcla es suficiente para permitir la entrada de aire a los poros y que las pilas sean periódicamente mezcladas para reconstruir los poros de la mezcla [12].

La frecuencia de volteo de las pilas depende directamente del área de la pila, si la pila es demasiado grande el calor se concentrará rápidamente en el medio mientras se esté produciendo el proceso aerobio, por esta razón es recomendable estar midiendo constantemente la temperatura de la pila ya que una baja temperatura o un mal olor son señal de que es necesario voltear para generar poros y cambiar digestión. Los tanques además pueden eliminar los problemas climáticos, conteniendo los olores y manteniendo un mejor control de la temperatura.

1.2.2.c. En tanques. Por la escasez de aire en las pilas pasivas, se empezaron a buscar alternativas para cumplir con esta necesidad por lo que se planteó la idea de poner unas paredes alrededor del montículo de compostaje, esto con dos objetivos, el primero aprovechar el área donde se deposita la materia y el segundo forzar el paso de aire a través del suelo con el fin de mantener el proceso aerobio, esto evitando el tener un horario de volteo establecido. Los tanques además pueden eliminar los problemas climáticos, contener olores y mantener un mejor control de temperatura [12].

Hay diferentes variaciones de este proceso y cada una de ellas va relacionada al presupuesto que se tenga. A través del tiempo se ha optado por optimizar esta tecnología ya que las paredes permiten una mayor acumulación de materia en un área menor, todo esto comparado a las pilas pasivas.

Dentro de las formas más industrializadas de producción de compostaje en tanques se encuentran diversos tipos como el compostaje en cama, en silos y en troncos giratorios. En la tabla 1 se puede apreciar un resumen de características de cada uno de estos procesos.

Tabla 1.

Métodos especializados de compostaje en tanques

Cama	Silos	Tronco giratorio
Consiste en una cama retenida de paredes las cuales están encajadas un mecanismo el cual voltea la materia orgánica. Este avance de posición del cuerpo permite que se voltee y se reestructuren los poros por donde ingresa el aire. Otros modelos especializados no solamente se fían del volteo si no que igual al diseño base implementan en el suelo un sistema de aire forzado. Este es un proceso totalmente automático.	Consiste en un tanque en forma de silo del cual se retira a diario el compostaje por la parte inferior de este, y a su vez se deposita materia nueva por el tope. Tiempo de residencia en este tanque es de catorce (14) días [12]. Este proceso requiere de un segundo silo tipo reactor para conseguir una mejor compactación del cuerpo ya que durante el tiempo de compostaje solamente recibe aire forzado, pero no es movido.	Es un troco hueco que rota sobre un eje y está constantemente en suministro de aire en contracorriente al flujo de materia. Este proceso tiene un tiempo de residencia de trece (13) días, además requiere de una o dos cámaras más para el proceso si llegara a ser necesario para cumplir la descomposición total, esto lo hace un proceso un poco incierto por la necesidad de otro equipo igual para culminar.

Nota: Comparativa sencilla entre los 3 tipos de compostaje en tanques.

1.2.2.d. Hileras parcialmente aireadas. Comparado con el sistema de aireación forzada de los tanques, el compostaje por hileras parcialmente aireadas es un camino más económico y fácil para convertir las excretas de animales y residuos agrícolas para el compostar. En los sistemas aireados, el flujo de aire que es necesario como suministro de oxígeno y útil para remover el calor por medio de la convección natural [17]. Este sistema elimina la tarea de rotar esto con la inserción de unos tubos a través de la pila.

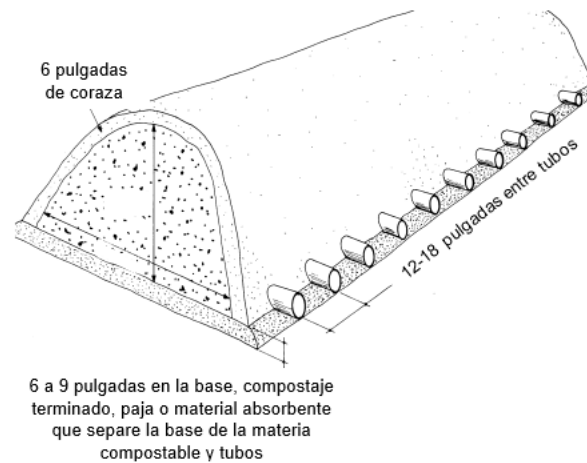
El sistema consiste en unas tuberías similares a las de los conductos de agua o PVC insertadas sobre paja o compostaje terminado y la pila con una consecutiva de hoyos dirigida hacia arriba, esto con la intención de que el aire penetre la pila, absorber la humedad y de igual forma aislar la pila del suelo. El buen rendimiento de estas pilas depende del área que tenga, en el caso de que la pila demasiado alta, provocara un peso sobre el efluente de aire siendo este insuficiente para penetrar el cuerpo y si es demasiado pequeña la pila puede llegar a perder la temperatura adecuada para el proceso aerobio.

Una ventaja de este proceso es que mantiene los olores y la carga de nitrógeno dentro de la pila ya que no es necesario voltearla, esto debido a que la capa superficial funciona como una coraza que evita la volatilización de los compuestos.

La figura 4 propone unas medidas industriales para la construcción de una hilera de compostaje junto al distanciamiento entre tubos de aireación. Este diseño solamente se debería tomar de referencia para llevarlo a escala en caso de que se realice de forma más compacta, para tener en cuenta que el proceso se realice de manera correcta.

Figura 4.

Hilera de compostaje con aeración pasiva



Nota: Concepto del compostaje industrial en aeración pasiva. Tomado de: *R. Rynk et al., On-Farm Composting Handbook, vol. 2. 2018.2003.*

1.2.2.e. Pilas estáticas aireadas. Este es un sistema basado en los fundamentos de las hileras parcialmente aireadas, la diferencia radica en que el suministro de aire es proporcionado artificialmente por un ventilador. Las ventajas de este proceso sobre el natural es un mejor control sobre la concentración de oxígeno oscilando en un intervalo apropiado del 15% a 20% para favorecer la actividad metabólica de los microorganismos aerobios que desarrollan el proceso [18].

El oxígeno proporcionado se puede suministrar de distintas formas; puede ser en intervalos, en forma continua o también se puede ligar un lazo donde la temperatura de la hilera proporcione la

información para la inyección de aire. En la figura 5 se muestra un sistema de aireación dentro de la columna de forma artificial.

Figura 5.

Suministro de aire para el sistema de compostaje.



Nota: Detalle diferenciador entre las pilas estáticas con aireación forzada. Tomado de Andalucía Luz, “*Sistemas Y Técnicas Para El Compostaje*”, Junta de Andalucía, vol. 1, p. 7, 2000, [En línea].

1.2.3. Factores críticos en el proceso de compostaje

El compostaje es un proceso que ocurre en la naturaleza espontáneamente, pero el éxito en su eficiencia viene dado por diferentes criterios manipulables que mantienen estable el producto final. El compostaje depende directamente del tratamiento que realicen los microorganismos sobre la materia orgánica y de esta manera también en qué condiciones estén estos. Para un buen fertilizante se requiere de una fermentación aeróbica en todo momento.

En las últimas décadas, las investigaciones han estado enfocadas en el estudio de la compleja interacción entre los factores físicos, químicos y biológicos que ocurren durante el proceso de compostaje. Por lo tanto, el control de los parámetros tales como la densidad, pH, humedad y

suministro de oxígeno se consideran como variables críticas que afectan el rendimiento de la degradación o digestión aerobia. Los factores que pueden afectar el proceso de compostaje se dividen en dos (2) grupos; los que dependen de la formulación en la mezcla del compostaje, tales como el balance de nutrientes (C:N), pH, tamaño de partícula, porosidad y humedad; y los que derivan del manejo del proceso, tales como la concentración de oxígeno, temperatura y contenido de agua [19]. Esta división se realiza a partir de la observación del proceso reconociendo los límites inferiores y superiores que permitan describir las condiciones críticas y sus efectos durante el proceso.

“El primer parámetro a exponer es la humedad donde se encuentra un rango optimo o trabajable de 45% a 60% en el que si se ubica un valor abajo del límite inferior, se encontrará un ambiente que imposibilita la movilidad de los microorganismos a través del cuerpo a compostar, si se traslada, arriba del 60% en humedad se limitará el proceso en cuanto a la cantidad de oxígeno dando libertad al inicio anaerobio.”[13].

La temperatura varía dependiendo de la etapa del proceso en la que se este, pues como se mencionó anteriormente dentro de estas etapas se presentan diferentes clases de microorganismos tanto mesófilos como termófilos determinando una temperatura clave de operación por cada una de las fases. La referencia [13] define unas posibles problemáticas que se pueden presentar según los límites de proceso. En el caso de estar por debajo de los 35 °C, se reportan tres posibles causas; la primera es una humedad insuficiente impidiendo el desarrollo y una velocidad metabólica de los microorganismos; la segunda es la falta de materia, esto haciendo referencia a una pila demasiado pequeña que permita el fácil acceso de aire y arrastre de humedad y por último está el déficit de la relación carbono y nitrógeno que garantiza el buen desarrollo de bacterias y hongos en la pila. Por otro lado, en el límite superior, si se reportan temperaturas sobre los 70 °C esto se debe a una ventilación y/o humedad inadecuada.

El pH al igual que la temperatura varía según la etapa de compostaje en la que se encuentre la materia, pero se pueden determinar unos límites al igual que los anteriores parámetros. Si el pH se encuentra por debajo de 4,5 se puede atribuir como un problema en la materia prima debido a que posee demasiados ácidos orgánicos, aumentando la acidez del medio, para esto se recomienda el

uso o el complemento de materiales ricos en nitrógeno y una moderación con estos de la relación carbono y nitrógeno. Si la pila se encuentra en un pH por encima de 8,5, se puede debe al uso de materia prima alta en nitrógeno por lo que de igual manera que el límite inferior se debe complementar y regular otro material, pero esta vez rica en carbono.

La aireación es un parámetro importante y único en el compostaje, ya que la manipulación de este parámetro modifica los demás en gran medida por efecto en cadena, es decir, un parámetro afecta uno y el otro de igual manera. De aquí la necesidad de controlar este, definiendo un rango variable de ingreso de aire, definido en la estructura de la pila y en parámetros como la humedad y características de la materia prima como la densidad o tamaño de partícula. La medición de este parámetro viene atada del control de otros como la temperatura y humedad.

1.3. Biodigestión

La biodigestión es un proceso biológico en cual algunos microorganismos especializados se encargan de degradar el material orgánico o biomasa depositada en el interior de un tanque llamado biodigestor el cual se puede considerar como un reactor batch, si se realiza una digestión anaerobia, o semicontinuo en el caso de trabajar en condiciones aerobias.

Dentro del proceso de biodigestión se obtienen productos de gran interés como el biogás, compuesto mayoritariamente por metano, abono sólido procesado y fertilizantes orgánicos líquidos ideales para el acondicionamiento de suelos de cultivos y la restitución de campos de forrajes. El producto que se obtiene en mayor proporción es el biogás, que es utilizado como combustible para generadoras eléctricas, como sustituto de la leña en la cocción de alimentos o en vehículos.

Visto desde un enfoque socio ambiental la biodigestión se ha posicionado como una herramienta de apoyo que permite aprovechar los diferentes residuos provenientes del agro como lo son los desechos de cultivos, las excretas animales, material vegetal leñoso y residuos domésticos. Esto con el fin de reducir la contaminación de los suelos, las fuentes fluviales y las emisiones generadas por las diferentes actividades ganaderas. Asimismo, la implementación de

este mecanismo de aprovechamiento de residuos permite erradicar plagas y microorganismos patógenos que representan un riesgo para la salud pública, el bienestar de los animales y el correcto desarrollo de los cultivos.

1.3.1. Tipos de biodigestores

Los biodigestores pueden clasificarse según la forma en la que se suministra la alimentación como batch, continuos y semicontinuos. También pueden agruparse según el contenido de humedad que contenga la mezcla de biomasa-sustrato en digestores húmedos, semihúmedos y secos. Por otra parte, se puede considerar el grado de tecnología que emplea el tanque durante su operación, clasificándolos como tecnología baja, que son comúnmente empleados en las zonas rurales para el aprovechamiento de residuos agrícolas; tecnología media los cuales se caracterizan por no tener un sistema de control e instrumentación definido, pero requieren de más trabajo y atención que los de tecnología baja; los de tecnología alta que son empleados en las plantas estandarizadas de producción de biogás, se caracterizan por tener un arduo diseño ingenieril debido a que se manejan cargas grande de materia orgánica provenientes generalmente de los residuos de las diferentes industrias.[20] Otra clasificación no menos importante es según el manejo de sustrato, pues hay digestores a los cuales no se les realiza la adición de sustratos que permitan mejorar la eficiencia de los procesos.

Teniendo en cuenta que para esta investigación los productos de interés son el abono líquido y solido que se obtienen durante el proceso de degradación, se describirán los biorreactores que se encuentran tipificados según la carga con un grado de tecnología bajo e intermedio para cargas húmedas con y sin adición de sustrato. Esto debido a que son los tipos de biodigestores que se ajustan a los requerimientos estudiados en este documento.

1.3. 1.a. Biodigestores batch. Se caracterizan por ser sistemas cerrados que son alimentados al inicio de la operación, cuyo producto es retirado después de haber culminado todas las etapas de degradación y conversión de la materia prima. Estos biodigestores son utilizados normalmente en procesos de investigación a una escala de laboratorio, con el fin de establecer si un material es apto para producir biogás, determinar los potenciales de algunos sustratos incorporados durante el

proceso de digestión [20]. En la figura 6 se pueden evidenciar cuatro prototipos de reactores batch para ensayos a escala de laboratorio.

Los biodigestores batch también son empleados para hacer experimentaciones a escala piloto, pues de esta manera se puede evidenciar fácilmente el comportamiento de las variables críticas del proceso como el pH, la temperatura, el comportamiento del sistema con un sustrato determinado y la idoneidad del material seleccionado para el tanque.

Figura 6.

Reactores batch de laboratorio



Nota: Reactores tipo batch contruidos con tinas plásticas equipados con un escape de metano. Tomado de <https://planetagronomico.com/taller-de-construccion-de-un-biodigestor-casero-para-elaboracion-de-biopreparados/>

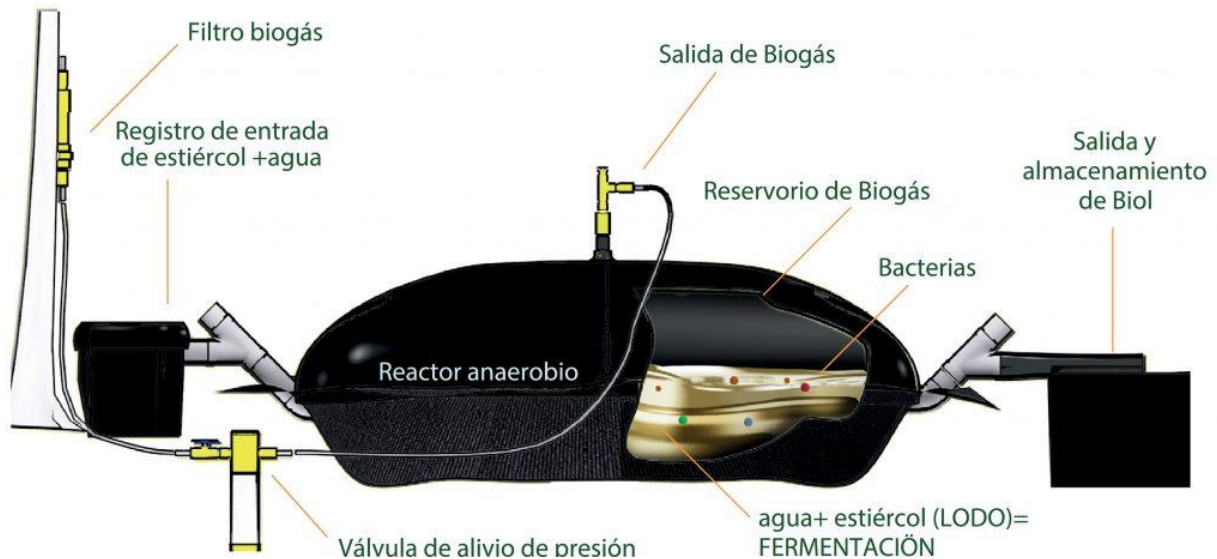
Este tipo de biodigestor es usado en procesos en los cuales la materia prima es difícil de digerir y las etapas tienen un periodo de duración más extenso que el normal, especialmente la etapa metanogénica que se debe dar en ausencia total de oxígeno para que los microorganismos que intervienen en ella tengan un rendimiento satisfactorio. En estos casos resulta conveniente implementar un sistema discontinuo o por lotes, debido a que el tanque en el que ocurre el proceso biológico permanece cerrado hasta que se culmina el proceso de digestión evitando la entrada de aire.

1.3.1.b. Biodigestores taiwaneses. Son conocidos como digestores flexibles debido a que son contruidos con membranas de diferentes grosores que forman una estructura tubular dentro de la

cual se llevará a cabo el proceso de conversión de la materia prima. Se caracteriza por ser un digestor de carga continua, es decir, que la alimentación es constante. Asimismo, está tipificado como un mecanismo de baja tecnología al que no se le realiza adición de sustrato.

En la figura 7 se muestra el sistema de digestión taiwanés, conformado por un tubo de alimentación; un fermentador y una cámara de almacenamiento de gas; un tubo para la salida del efluente; un tubo de salida de gas y una válvula de alivio para controlar la presión [21]. El tubo flexible normalmente es instalado de manera horizontal dentro de una fosa cavada en el suelo con el fin de aislar térmicamente el sistema. Este tubo debe estar construido en un material con un espesor mayor a 0,80 mm, resistente al ataque químico y a los rayos ultravioleta [20]. El sistema de digestión está conformado por un tubo de alimentación; un fermentador y una cámara de almacenamiento de gas; un tubo para la salida del efluente; un tubo de salida de gas y una válvula de alivio para controlar la presión [21]. El tubo flexible normalmente es instalado de manera horizontal dentro de una fosa cavada en el suelo con el fin de aislar térmicamente el sistema. Este tubo debe estar construido en un material con un espesor mayor a 0,80 mm, resistente al ataque químico y a los rayos ultravioleta [20]. El tubo flexible normalmente es instalado de manera horizontal dentro de una fosa cavada en el suelo con el fin de aislar térmicamente el sistema. Este tubo debe estar construido en un material con un espesor mayor a 0,80 mm, resistente al ataque químico y a los rayos ultravioleta [20].

Figura 7
Biodigestor taiwanés



Nota: Representación gráfica de un biodigestor taiwanés parcialmente enterrado. Tomado de: Tecnosol, *Zona rural: sistemas de biodigestión*, Managua.

Para comprender el funcionamiento de este mecanismo de biodigestión es importante saber que está diseñado para fincas que tienen como actividad económica principal la ganadería y que deben realizar un lavado periódico de los establos, corrales o pocilgas, generando como residuo una mezcla de excretas y agua que cae directamente a los desagües. En los lugares donde se realiza este procedimiento el tubo de alimentación se instala de tal manera que reciba el estiércol con agua para llevarlo hasta el fermentador en donde debe permanecer entre treinta (30) a cincuenta (50) días dependiendo de las condiciones climáticas donde este instalado. Al iniciar la generación de biogás la presión al interior del sistema aumenta haciendo que se desplace líquido por el tubo de efluentes, este líquido es utilizado como abono para la aspersión de cultivos, por esta razón en se acostumbra instalar un tanque colector en cual se almacena el producto previamente filtrado para luego ser llevado a los sistemas de riego. Por otra parte, el gas va saliendo a través del tubo conectado al colector de gas, en el caso de que la presión aumente hasta el punto de tensionar las membranas del biodigestor, se activa la válvula de alivio para liberar gas y disminuir la presión del sistema.

Algunas consideraciones importantes que se deben tener en cuenta a la hora de construir un biodigestor taiwanés son; analizar las condiciones topográficas del terreno en cual se va a instalar

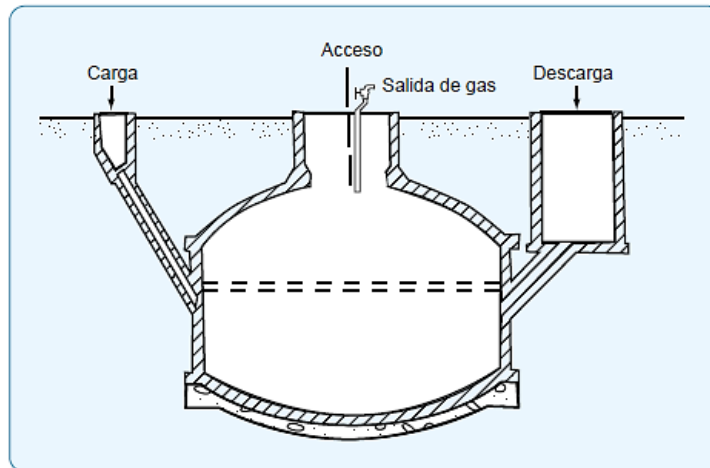
el tubo flexible, pues se debe garantizar que las paredes de la fosa cavada permanezcan firmes con una baja probabilidad de derrumbarse; retirar las piedras cortantes de las paredes y el fondo de la fosa para evitar perforaciones de la membrana del fermentador y la cámara de gas; finalmente, durante la instalación de la membrana se debe verificar que las superficies de la misma sean uniformes y con sellado hermético entre uniones para evitar fugas del combustible.

1.3.1.c. Biodigestores chinos. También son conocidos como reactores rígidos, debido a que están contruidos con materiales de alta dureza como ladrillo, hormigón, concreto y piedras; lo que a su vez los hace más estables, resistentes e intransportables.

Este biorreactor se caracteriza por tener una operación semicontinua con una tecnología de operación baja a pesar de su complejidad de construcción, pues la cámara de digestión, la cámara de gas, la cámara de regulación y una parte de la zona de descarga se encuentran bajo tierra. El tanque principal es cilíndrico, con piso y techo en forma de domo, este último es fijo por este motivo también es conocido como planta de cúpula fija. En la figura 8 se pueden evidenciar cada una de las partes de este tipo de digestor.

Figura 8.

Biodigestor chino



Nota: Representación gráfica de un reactor chino con cúpula fija. Tomado de: FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, *Manual del Biogás*. Santiago de Chile, 2011.

El proceso comienza al introducir la materia prima en el contenedor de carga; este material de alimentación está conformado mayoritariamente por residuos agrícolas. La carga es llevada por medio de un tubo hasta el tanque de fermentación en el que se iniciara el proceso de degradación biológica realizado por los microorganismos presentes en la materia orgánica.

Por otra parte, el proceso de producción de gas se da de la siguiente manera, los purines se desplazan al depósito de compensación. La presión del gas aumenta con el volumen de gas almacenado y la diferencia de altura entre el nivel de los purines en el digestor y el nivel de los purines en el tanque de compensación [22].

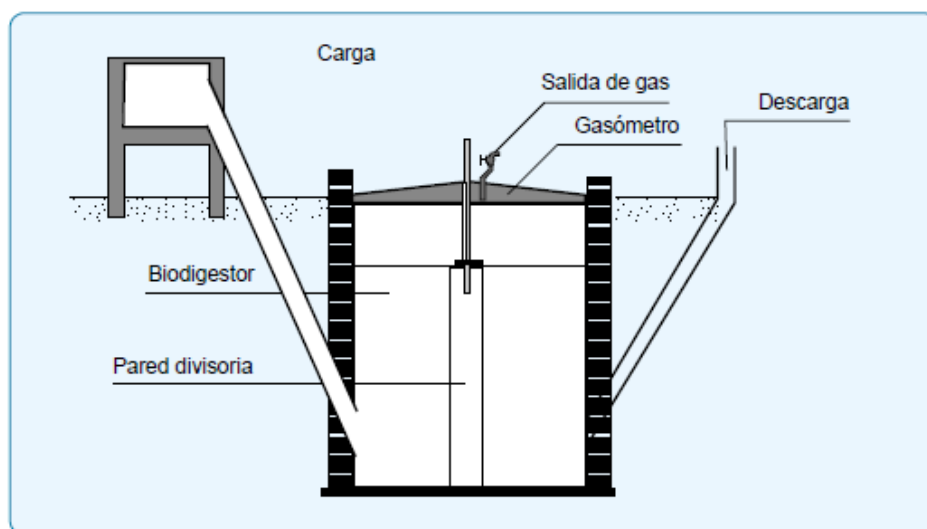
1.3.1.d. Biodigestores de tipo hindú. Son también conocidos como biodigestores de campana flotante se caracterizan por tener el tanque de fermentación enterrado de manera vertical, al igual que los biodigestores chinos, pero a diferencia de estos el fondo del tanque es plano y la parte superior del mismo es una campana flotante en la que se almacena el gas. Esta campana tiene como objetivo mantener la presión constante dentro del sistema, descendiendo o ascendiendo según la cantidad de gas generada, asimismo ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en los biodigestores [23]. La figura 9 permite apreciar los componentes de un biodigestor de tipo hindú.

Las paredes, zona carga y descarga de este tipo de digestor se construyen con materiales rígidos como cemento, hormigón, piedra y ladrillo, mientras que la campana o tambor se construye normalmente con acero al carbón, este debe tener una válvula de alivio y otra válvula de salida de gas, que se encarga de sacar el gas para almacenarlo en pozos o cilindros.

Antes de construir el biodigestor es necesario conocer las condiciones geográficas y topográficas del terreno en el cual se va a realizar la excavación, esto con el fin de verificar que el terreno no presente fallas geológicas como el hundimiento o la sedimentación, pues esto, puede afectar la estructura del tanque fermentador, causando grietas en las paredes y en el fondo del mismo, a través de las cuales se puede fugar el gas o los líquidos del digestato.

Figura 9.

Biodigestor hindú



Nota: Representación gráfica de un biodigestor tipo chino con cúpula móvil. Tomado de: FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, Manual del Biogás. Santiago de Chile, 2011.

El biodigestor hindú se alimenta de manera continua, depositando la materia prima en la zona de carga que se encuentra sobre unos soportes en la superficie, esto con el fin de usar la gravedad y facilitar la descarga hacia el tanque digestor, en donde se encuentra una pared divisoria que tiene

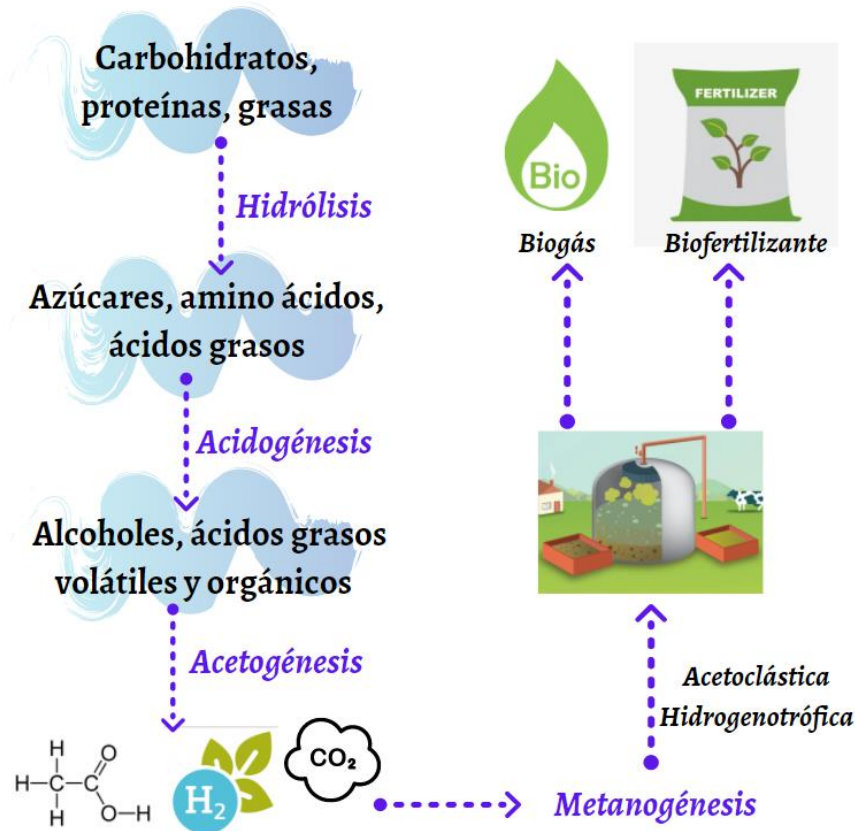
como función separar el material recién cargado del digestato, además en la parte superior de esta se encuentra adaptado un riel que permite el movimiento vertical de la campana.

1.3.2. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia se divide en cuatro etapas, en las cuales tienen lugar reacciones biológicas simultáneas producidas por diferentes grupos de microorganismos facultativos y extremófilos. El mecanismo de reacción anaeróbico es comparado con el sistema digestivo de los rumiantes, pues en sus cuatro estómagos tienen lugar una hidrólisis de polímeros, seguida de una acidificación y una acetogénesis en la cual se producen acetatos y ácidos que son procesados por el rumen con el fin de equilibrar el pH y realizar la metanogénesis. En el caso de los biodigestores los ácidos y acetatos son consumidos por microorganismos metanogénicos que producen biogás y biofertilizante. En la figura 10, se describen las fases involucradas en el proceso.

Figura 10.

Fases de la digestión anaerobia



Nota: Fases que ocurren durante la digestión microbológica por parte de microorganismos anaerobios.

1.3. 2.a. Hidrólisis. Es la primera etapa en el proceso de digestión anaerobia, consiste en la degradación de la materia orgánica compleja, es decir, carbohidratos, grasas y proteínas; esto debido a la acción de microorganismos facultativos que se encargan de romper las cadenas largas a través de un mecanismo de catálisis enzimática donde participan principalmente enzimas extracelulares como la celulasa, amilasa, proteasa y lipasa.

La transformación del material orgánico insoluble es necesaria para que se den las etapas posteriores, pues los microorganismos involucrados en ellas no tienen la capacidad de sintetizar cadenas largas, haciendo que la disponibilidad de sustrato sea baja. El objetivo de la hidrólisis es

generar materiales orgánicos solubles que sirvan como fuente de energía y compuestos orgánicos simples indispensables para el desarrollo de las comunidades bacterianas que realizan las etapas contiguas.

Los microorganismos involucrados en la hidrólisis son bacterias facultativas aerobias de naturaleza sacarolítica, es decir, que rompen las cadenas de azúcares grandes como el almidón transformándolas en monosacáridos. Asimismo, se encuentran bacterias proteolíticas que se encargan de transformar las proteínas en amino ácidos, entre ellas se pueden encontrar *Pseudomonas*, *Klebsiella* y *Clostridium* que se caracteriza por ser una bacteria anaerobia estricta, es decir, que crece y se desarrolla sin presencia de oxígeno.

La velocidad de descomposición a lo largo de la etapa de hidrólisis depende directamente de la naturaleza del sustrato. La transformación de la celulosa y la hemicelulosa generalmente es más lenta que la descomposición de las proteínas [24].

1.3.2.b. Acidogénesis. En esta etapa microorganismos facultativos y anaerobios estrictos se encargan de tomar los ácidos grasos, los amino ácidos y los monosacáridos para transformarlos en alcoholes, hidrogeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos de cadenas corta como ácido acético, ácido propanoico y ácido butírico.

Esta etapa se caracteriza por ser la más rápida del proceso de biodigestión, debido a que los microorganismos que intervienen en ella son tolerantes a cambios de temperatura, pH y a la presencia o ausencia de oxígeno. Uno de los parámetros críticos que se debe controlar es la acidificación o descensos de pH, pues las bacterias que intervienen en la etapa de metanogénesis no toleran un pH bajo, haciendo que el rendimiento sea bajo o casi nulo.

Por otra parte, un factor que se considera determinante dentro de esta etapa es la cantidad de hidrogeno producido, pues la presión parcial de este afecta directamente la cantidad de compuestos reducidos; si la presión parcial del hidrogeno fuera elevada los monosacáridos, ácidos grasos y aminoácidos se transformarían en ácidos orgánicos y alcoholes[24].

1.3.2.c. Acetogénesis. La acetogénesis también llamada acidogénesis intermediaria [25], es la fase de la biodigestión que se encarga de convertir los ácidos orgánicos en acetatos, para que puedan

ser metabolizados por las bacterias metanogénicas. Durante esta fase bacterias anaerobias toman los ácidos grasos volátiles, alcoholes y algunos compuestos aromáticos como sustrato para producir hidrogeno y acetatos por medio de reacciones oxidativas anaerobias que depende de la presión parcial de hidrogeno, la cual debe ser baja, para ello es necesaria la intervención de un grupo de bacterias de la fase de metanogénesis con el fin de que estas consuman progresivamente el hidrogeno generado durante la acetogénesis manteniendo bajas presiones parciales favoreciendo el avance de las reacciones oxidativas anaerobias.

Los microorganismos que se han logrado identificar en diferentes estudios son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*, también se han encontrado microorganismos acetogénicos llamados homoacetogénicos [20]; este tipo de microorganismos tiene la habilidad de crecer de forma heterótrofa cuando se encuentra en medios de cultivo con azúcares y monocarbonados, cabe destacar que solo pueden producir acetatos a diferencia de las otras bacterias acetogénicas que producen hidrogeno. El *Clostridium acetivum* es el microorganismo homoacetogénico más estudiado debido a que se ha podido aislar exitosamente en varias investigaciones.

1.3.2.d. Metanogénesis. La metanogénesis se puede presentar por dos vías metabólicas; la primera es conocida como acetoclástica en la cual los microorganismos metanogénicos toman el ácido acético, el metanol y algunas aminas para convertirlo en metano y dióxido de carbono. La segunda vía metabólica es la hidrogenotrófica que consiste en la captación del hidrogeno y el dióxido de carbono generados durante la acetogénesis para producir metano. Los microorganismos presentes en esta etapa son estrictamente anaerobios y sensibles a los cambios de pH, haciendo que la metanogénesis sea la fase crítica durante el proceso de digestión, pues en esta es donde se obtienen los productos de interés como el biogás y el digestato que se utiliza como biofertilizante por su alto contenido en macro y micro nutrientes.

Las bacterias metanogénicas pertenecen al grupo de las Archaeas, por tal motivo presentan características biológicas, químicas y moleculares que las hacen diferentes de los otros microorganismos que intervienen en el proceso global. Las Archaeas involucradas en esta etapa se consideran extremófilas debido a que se desarrollan en ausencia total del oxígeno, además poseen un sistema metabólico limitado y por tal motivo su mecanismo de nutrición es quimioautótrofo.

Por otra parte, la pared celular de estos microorganismos difiere con respecto a las bacterias, pues las Archaeas carecen de péptidoglicano. Otra diferencia marcada es el mecanismo de replicación, transcripción y traducción del material genético, pues estas realizan un proceso similar al de las células eucariotas.

Esta fase es la más lenta dentro del proceso de digestión debido a que los microorganismos que intervienen en ella tienen una reproducción lenta con una demanda energética elevada, dicha energía se suministra principalmente en forma de calor elevando la temperatura del proceso para favorecer la tasa de crecimiento poblacional de estos procariontes.

1.3.3. Parámetros críticos de la digestión anaerobia

Todos los procesos ya sean químicos o biológicos tienen unos factores que se consideran críticos para el desarrollo del mismo. Estos parámetros se deben evaluar con el fin de identificar qué variables se deben controlar para tener un óptimo rendimiento; en el caso de los procesos biológicos se deben analizar las condiciones físicas y químicas que favorecen el crecimiento, la estabilidad y el rendimiento de los microorganismos utilizados en el mismo.

La biodigestión anaerobia es un proceso biológico en el que intervienen diferentes grupos de microorganismos en cada una de sus fases. Por tal motivo, es fundamental conocer que tipos de bacterias y microorganismos que intervienen en cada una de ellas para establecer los parámetros críticos que se deben controlar para alcanzar las metas de producción establecidas. Uno de los parámetros críticos que se deberían controlar son el pH, la temperatura, la humedad, el tiempo de retención hidráulica y la relación carbono/nitrógeno de la materia prima.

El control de pH consiste en medir periódicamente la acidez o la alcalinidad del medio, esto con el fin de evitar condiciones como la acidosis que inactiva el metabolismo de la gran mayoría de microorganismos que intervienen en el proceso. Por otra parte, el control de temperatura se debe hacer de forma continua para garantizar que están avanzando las etapas de biodigestión, puesto que la temperatura debe aumentar entre cada una de las etapas, confirmando que el proceso

avanza de manera satisfactoria; además permite evitar los descensos de temperatura que afectan drásticamente el proceso.

El tiempo de retención hidráulica es aquel que permite conocer el tiempo medio de permanencia del sustrato en el biodigestor [20], este tiempo se calcula como el cociente entre el volumen del reactor y el flujo volumétrico diario de carga. Esto se realiza con el fin de asegurar la disponibilidad de sustrato en el digestor.

La relación carbono nitrógeno (C: N) es la proporción entre esos compuestos presente en un material orgánico o sustrato [23]. Calcular esta relación antes de iniciar el proceso de digestión es fundamental, debido a que los dos elementos son necesarios para el desarrollo de los procesos microbiológicos que se dan durante la degradación de la materia prima. El carbono es utilizado por los microbios como fuente de energía mientras el nitrógeno es empleado como precursor de la regeneración y el crecimiento celular. El rango de relación C: N ideal para comenzar el proceso de biodigestión es de 25 C: N a 30 C: N; si el material orgánico no se encuentra dentro de este rango se debe realizar un ajuste adicionando otros sustratos que aumenten o disminuyan la proporción dependiendo del caso.

1.4. Legislación de producción y manejo de abono en Colombia

1.4.1. Reglamentación para el manejo de excretas bovinas en Colombia

La resolución 002341 del 23 de agosto de 2007 “tiene por objeto establecer los requisitos sanitarios que deben cumplir los predios de producción primaria dedicados a la producción de bovinos y bufalinos destinados para el consumo humano.”[26] Asimismo, se fijan los parámetros de inocuidad que se deben cumplir en los predios de producción de carne destinada al consumo humano, el manejo y disposición de los residuos generados (excretas), indicando la frecuencia con la que se deben limpiar los establos y el plan de manejo de plagas con el fin de garantizar la bioseguridad de los animales, los cuidadores y minimizar el impacto ambiental.

El artículo nueve de esta resolución dispone que “todo predio destinado a la producción bovina o bufalina deberá minimizar y controlar los riesgos asociados a la producción, a través de la implementación de programas de saneamiento.”[26] para esto se recomienda establecer actividades como la limpieza de las instalaciones dependiendo del uso y el número de cabezas de ganado que se estén manejando; además, se debe tener un procedimiento para realizar la disposición final del tratamiento de los residuos generados durante el proceso de ceba.

1.4.2. Reglamentación para abonos en Colombia

El artículo nueve de esta resolución dispone que “todo predio destinado a la producción bovina o bufalina deberá minimizar y controlar los riesgos asociados a la producción, a través de la implementación de programas de saneamiento.”[26] para esto se recomienda establecer actividades como la limpieza de las instalaciones dependiendo del uso y el número de cabezas de ganado que se estén manejando; además, se debe tener un procedimiento para realizar la disposición final del tratamiento de los residuos generados durante el proceso de ceba. Reglamentación para abonos en Colombia. La resolución 00150 del 21 de enero del 2003 tienen como objeto «orientar la comercialización y el uso y manejo adecuados y racionales de los fertilizantes y acondicionadores de suelos, tanto para prevenir y minimizar daños a la salud, a la sanidad agropecuaria y al ambiente bajo las condiciones autorizadas, como para facilitar el comercio internacional; adicionalmente pretende establecer requisitos y procedimientos

armonizados con las reglamentaciones internacionales vigentes, tanto para el registro como para el control legal y técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos; especialmente en lo relacionado con terminología, clasificación, composición garantizada, etiquetado, tolerancias, contenidos mínimos permisibles y parámetros para verificación de la conformidad.»[27]

En la resolución 00968 modifica los artículos 14, 26, 29 y 33 de la resolución 00150 del 2003 con el fin de intensificar los requisitos para importar, distribuir o comercializar fertilizantes y acondicionadores de suelo; exigiendo soportes como “certificados de análisis físicos, químicos o microbiológicos realizados por laboratorios registrados ante el ICA, fichas técnicas de las materias primas, hoja de seguridad del producto”[28], entre otras. Adicionalmente, se establecen las consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de elegir el nombre comercial del fertilizante y los acondicionadores entre estas se encuentran la adición de sufijos o adjetivos calificativos como concentrado, débil, mega y BIO.

2. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO

2.1. Generalidades de la finca

La finca Mirador de las Marías, ubicada en la vereda Agua clara en el municipio de Guaduas Cundinamarca, cuenta con un clima cálido con una temperatura promedio de 25°C. Está se encuentra a una altura aproximada de 1175 metros sobre el nivel del mar. Tiene una extensión de veinte (20) hectáreas, de terreno pendiente. Su actividad económica principal es la producción de ganado bovino de engorde para sacrificio y consumo (ganadería), para lo cual cuentan con dieciséis (16) cabezas de ganado. Los animales tienen como mecanismo de alimentación el pastoreo y establo, es decir, que permanecen nueve (9) horas en el establo donde son alimentados con pollinaza sanitizada mezclada con melaza; las quince (15) horas restantes son trasladados a los campos con forrajes. En la figura 11 se puede observar una parte de la zona de establos y los comederos en los que se le suministra el alimento a los animales.

Figura 11.

Establo mirador de las marías

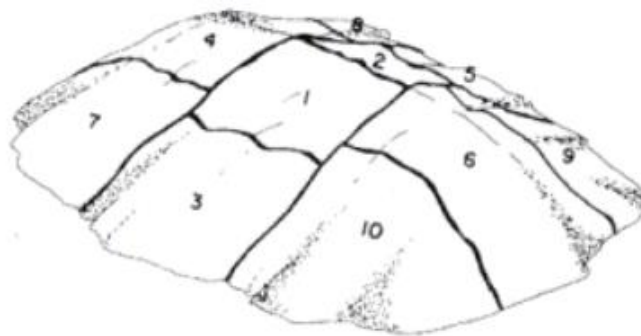


Nota: Fotografía capturada durante la primera visita a la finca.

Durante el proceso de ceba de los bovinos se generan excretas animales que son retiradas de los establos una vez cada tercer día con el fin de producir abono por el método de compostaje formando pilas no cónicas, figura 12, soportadas directamente sobre el suelo, estas son volteadas manualmente hasta completar el proceso de enfriamiento para finalmente empacarlas en lonas y almacenarlas para abonar los campos de forrajes al hacer la rotación de los animales entre un campo y otro.

Figura 12.

Pila no cónica



Nota: Representación gráfica del método de muestreo en pilas no cónicas de abono. Tomado de: R. Rynk *et al.*, *On-Farm Composting Handbook*, vol. 2. 2018.

2.2. Proceso de recolección de muestras

Con el fin de caracterizar el proceso de disposición actual de las excretas generadas en los establos se realizaron muestreos de elementos directamente implicados en la problemática identificada durante una de las visitas realizadas a la finca; en donde se estableció tomar una muestra del suelo sobre el cual se forman las pilas de compostaje; una muestra del abono que se está produciendo y dos muestras de excremento.

2.2.1. Muestreo del suelo

El análisis de suelo es una herramienta necesaria en el sector agrícola ya que permite tener una base para la toma de decisiones permitiendo conocer las necesidades de abono o para enmendar problemas que tiene el suelo. En este caso, el análisis de suelo se realizó con el fin de evidenciar si se está presentando contaminación del suelo debida a la sobrecarga de macro y micro nutrientes, generada por la mala disposición de las excretas en el proceso de compostaje.

Basados en la guía de tomas de muestras de suelo para análisis químicos y físicos GA-G-17 ver [29] proporcionado por el laboratorio contratado AGROSAVIA en el que se hallan las herramientas, metodologías y conceptos necesarios para la recolección del suelo, todo esto fundamentado bajo la NTC 4113-2 que es la guía sobre técnicas de muestreo y la ISO 2859-1 que destaca los procedimientos de muestreo por atributos.

Para el análisis químico es necesario tomar una prueba disturbada que se caracteriza por no tener las mismas propiedades in situ por su condición de ser una mezcla de varias trazas recolectadas de un área. Además, se debe de especificar la profundidad ya que con esto se obtiene mayor información de fertilidad para la siembra:

- Pasturas entre 10 cm a 20 cm de profundidad
- Hortalizas y la mayoría de hortalizas semestrales de 0 a 20 cm y 0 a 30 cm de profundidad.
- Cultivos como árboles frutales, forestales u ornamentales se recolectan de 0 cm a 40 cm y o de 0 cm a 60 cm.

Con la idea de obtener un análisis que tuviera resultados respecto a un cultivo de difícil desarrollo, se obtuvieron muestras a una profundidad de 40 cm localizadas en 4 partes diferentes dentro del área donde se ubican los montículos de excremento para el abono, esto si antes limpiando la zona y retirando cualquier muestra vegetal. Seguido se depositaron en un balde las submuestras y se mezclaron para tener una muestra uniforme del terreno, de esta muestra se tomó 1000 gramos y se dejaron en una bolsa de cierre hermético para mantener la humedad.

2.2.2. Muestreo del excremento

La recolección de las muestras de excremento se realizó en dos etapas, esto debido a que los estudios fueron desarrollados por dos laboratorios independientes, uno encargado de realizar los análisis fisicoquímicos, AGRILAB, y el otro encargado de ejecutar los análisis microbiológicos, ZOOLAB.

La primera etapa se llevó a cabo siguiendo las instrucciones dadas por el laboratorio AGRILAB en el documento COT-2020-1956, en el cual se establecen las condiciones de recolección, embalaje y aceptación o rechazo de la muestra, según lo establecido en la ISO 17025 del 2005; “esta norma proporciona los requisitos necesarios que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración, facilitando la armonización de criterios de calidad. El objetivo principal de ésta es garantizar la competencia técnica y la fiabilidad de los resultados analíticos.”[30]

Teniendo en cuenta lo anterior, se recolectaron 300 gramos de estiércol empleando una espátula previamente sanitizada. Inicialmente, se identificaron los montículos de heces frescas que presentaran una consistencia firme, luego se tomó una cantidad de 100 gramos de tres montículos seleccionados aleatoriamente, dicha muestra debía ser tomada colocando la espátula en centro, introduciéndola hasta tocar el piso del establo. Las tres submuestras se colocan en el mismo contenedor y se agitan hasta unificarlas completamente.

La segunda etapa consistió en la recolección de una muestra para la elaboración de un coprocultivo; el muestreo se realizó según lo establecido en el portafolio de rumiantes del laboratorio de análisis clínico veterinario ZOOLAB, que cuenta con la certificación de la norma ISO 17025 del 2005.

La muestra se recolectó desde la parte superficial de los montículos formados por la primera deposición de tres bovinos, razón por la cual se hizo un seguimiento de los animales desde el momento del ingreso al establo en las horas de la mañana. A las heces del primer vacuno se le retiró con una espátula la capa superficial del cúmulo para colocarla en un frasco para muestras veterinaria, este proceso se repite hasta completar 1 kg recolectado. Finalmente, se embolsó la muestra en una cava bien refrigerada para evitar la degradación de la muestra durante el transporte.

2.2.3. Muestreo del abono

Para realizar el muestreo del abono se tomó como referencia la guía GA-G-19 ver [31] para toma de muestra de abonos orgánicos establecida por el laboratorio contratado, AGROSAVIA. En esta se detallan los pasos a seguir durante el muestreo simple de fertilizantes sólidos, según lo establecido en la NTC-ISO-8633.

Las muestras se tomaron de bultos con un contenido inferior a los 50 kg, para determinar la cantidad de bultos a muestrear se aplicó la ecuación 1 teniendo en cuenta que para esa fecha la finca contaba con un total de 108 bultos de abono:

Ecuación 1

$$\text{Número de bultos a muestrear} = \sqrt{\text{número de bultos existentes}}$$

Una vez aplicada la fórmula se fijó una cantidad de 10 bultos a muestrear, estos se escogieron aleatoriamente con el objetivo de tomar una submuestra de 50 gramos de cada uno de los bultos previamente seleccionados, el abono se tomó con ayuda de un palustre o palín, haciendo una abertura en el centro del bulto. Una vez tomadas las submuestras se colocaron en una bolsa con cierre hermético, para realizar el mezclado presionando la superficie del empaque con las yemas de los dedos para lograr homogenizar la muestra total de 500 gramos. En la figura 13 se muestra la zona de almacenamiento donde se apilan los bultos de abono terminado.

Figura 13.

Bultos de abono empacados



Nota: fotografía capturada durante la primera visita a la finca.

2.3. Evaluación de los resultados de los análisis de laboratorio.

La evaluación de los resultados se realizó tomando como referencia los valores reportados en los informes emitidos por los laboratorios contratados comparándolos con los estándares de calidad exigidos por los entes regulatorios como el Instituto Agropecuario Colombiano (ICA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA).

2.3.1. Interpretación de resultados para muestra de suelo

Los factores que afectan el rendimiento de los cultivos son diversos; el de mayor importancia es la disponibilidad de nutrientes esenciales disponibles en el suelo. Cuando estos nutrientes no se encuentran en cantidades adecuadas, se debe realizar un acondicionamiento agregando fertilizantes químicos y/o abonos orgánicos que actúen como enmiendas que suplan las necesidades nutricionales de la planta que se desea cultivar [32]. Por esta razón, es fundamental realizar un análisis de suelos en el cual se identifiquen las características físicas y se cuantifiquen los macronutrientes disponibles en el terreno en el cual se desea cultivar.

La tabla 2 muestra los valores reportados por el laboratorio contratado (AGROSAVIA), los valores de referencia establecidos por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) en el manual de asistencia técnica número 25 y la interpretación asignada para cada uno de los resultados. Cabe aclarar que algunos de los valores de referencia como el pH, el azufre disponible y el fósforo son exclusivos para cultivos de maíz. Esta planta se eligió teniendo en cuenta que en el terreno estudiado se ha tratado de cultivar esta gramínea, pero no ha mostrado resultados satisfactorios, al igual que el frijol y el tomate.

Tabla 2.

Resultados de análisis para el suelo

Determinación Analítica	Unidad	Valor	Valor de referencia	Interpretación
pH (1:2.5)	Unidades de pH	6,61	5,6-6,4	Normal
Conductividad Eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	1,27	0-2	No salino
Materia Orgánica	%	2,95	Bajo: <3 Medio: 3-5 Alto: >5	Bajo
Fósforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	428,11	15-30	Alto
Azufre (S) Disponible	mg/kg	57,43	Menor 5	Alto
Capacidad Interc Catiónica Efect (CICE)	cmol(+) /kg	14,73	Bajo: <10 Medio: 10-20 Alto: >20	Media
Boro (B) Disponible	mg/kg	1,07	Bajo: 0-0,2 Medio: 0,2-0,40 Alto: 0,4	Alto
Acidez (AI+H)	cmol(+) /kg	ND	NA	No Indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+) /kg	ND	NA	Sin restricción
Calcio (Ca) disponible	cmol(+) /kg	8,44	Bajo: <3 Medio: 3-6 Alto: >6	Alto
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+) /kg	4,06	Bajo: <1,5 Medio: 1,5-2,5 Alto: >2,5	Alto
Potasio (K) Disponible	cmol(+) /kg	2,00	Bajo: <0,20 Medio: 0,20-0,40 Alto: >0,40	Alto
Sodio (Na) Disponible	cmol(+) /kg	0,23	Menor a 1	Normal

Tabla 2. Continuación

Hierro (Fe) Olsen Disponible	mg/kg	399,52	Bajo: 25 Medio: 25-50 Alto: 50	Alto
Cobre (Cu) Olsen Disponible	mg/kg	4,84	Bajo: 1 Medio: 1-3 Alto: 3	Alto
Manganeso (Mn) Olsen Disponible	mg/kg	6,99	Bajo: 5 Medio: 5-10 Alto: 10	Medio
Zinc (Zn) Olsen Disponible	mg/kg	68,46	Bajo: 1,5 Medio: 1,5-3 Alto: 3	Alto
Saturación de Calcio	%	57	Bajo: <30 Medio: 30-50 Alto: >50	Alto
Saturación de Magnesio	%	28	Bajo: <15 Medio: 15-25 Alto: >25	Alto
Saturación de Potasio	%	14	Bajo: <2 Medio: 2-3 Alto: >3	Alto
Saturación de Sodio	%	2	Menor 15	Normal
Saturación de Aluminio	%	0	Menor 25	Normal

Nota: Comparación de los valores entregados por el laboratorio contratado y los valores de referencia señalados en ICA, *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación*. Bogotá, 1992.

Teniendo en cuenta los resultados plasmados en la tabla 2 se puede determinar que el suelo sobre el cual se está realizando el proceso de compostaje presenta niveles atípicos de elementos menores como Zinc, Boro y Hierro. Asimismo, reportan valores altos de Fósforo Azufre, Calcio y Magnesio; razón por la cual se debe realizar una remediación del suelo que permita equilibrar los niveles de los macro y micronutrientes que se encuentran por fuera de los rangos de aceptación. Esto debido a que el terreno no presenta las condiciones óptimas para el desarrollo de las plantas de maíz, tomate y frijol, debido a que estas no tendrán un rendimiento de cultivo satisfactorio y algunas plantas pueden marchitarse debido a la sobrecarga de nutrientes que representa toxicidad para las plantas, como se indica en [32].

Es evidente que el proceso de compostaje realizado actualmente en la finca el mirador de las Marías afecta directamente el suelo, pues al colocar las pilas en contacto inmediato con este, se generan lixiviados que afectan la zona del apilado y los terrenos aledaños; debido a que la práctica se hace en la parte superior de un terreno pendiente quebrado que promueve el escurrimiento de los contaminantes haciendo que estos se depositen en mayor proporción en las zonas medias y bajas de la pendiente.

2.3.2. Interpretación de resultados para muestra de abono

Los abonos o fertilizantes son insumos agrícolas que aumentan el rendimiento de los diferentes cultivos, esto debido a que son utilizados para corregir el déficit de algunos macronutrientes y micronutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas. Por este motivo el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), el ministerio de agricultura y el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación (ICONTEC) gestionaron manuales técnicos y normas técnicas en los que se sugiere como usar o suministrar los diferentes tipos de abonos y que parámetros fisicoquímicos deben cumplir los productos utilizados en la industria agrícola para acondicionamiento de suelos.

Considerando lo expuesto en el párrafo anterior, se remitió una muestra del abono que se produce actualmente en la finca el mirador de las Marías, al laboratorio de análisis contratado (AGROSAVIA); con el fin de conocer los valores de cada uno de los parámetros de determinación analítica mostrados en la tabla 3 y compararlos con los valores de referencia la norma para determinar si el producto cumple los estándares de calidad.

Tabla 3.*Resultado de análisis del abono*

Determinación analítica	Unidad	Valor	Valor de referencia
Fosforo (P ₂ O ₅)	%	0,85	Mayor a 1
Cenizas	%	39,09	Máximo 60
Nitrógeno (N)	%	1,10	Menor a 1
Contenido de humedad	%	22,83	Máximo 20
Perdidas por Volatilización	%	38,09	Sin restricción
Carbono Orgánico Oxidable (CO)	%	18,42	Mínimo 15
Capacidad de retención de humedad	%	236,58	Mínimo su propio peso
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	cmol(+)/kg	29,96	Mínimo 30
Densidad	g/100 cm ³	0,26	Máximo 0,6
pH	Unidades de pH	5,79	Entre 4 a 9
Conductividad Eléctrica (C.E.)	dS/m	9,46	Sin restricción
Potasio (K ₂ O)	%	1,39	Mayor 1%
Relación Carbono/Nitrógeno (C:N)	Adimensional	12,96	Sin restricción Pero según la ONUAA debe ser ≥ 18

Nota: Comparación entre los resultados obtenidos en el laboratorio para el abono producido en la finca contra los valores requeridos en la NTC 5167 para abono sólido.

La interpretación de los resultados se basó en la norma NTC 5167 que establece los requerimientos específicos sobre los abonos orgánicos [33]. De esta manera, se pueden comparar

los resultados de las propiedades evaluadas por el laboratorio con los valores de referencia fijados para los fertilizantes o abonos orgánicos que se obtienen a partir de residuos animales con un proceso de transformación como el compostaje.

El problema de las plantas y el suelo es poder captar nutrientes elementales, razón por la cual son útiles los procesos digestivos que transforman estos elementos a compuestos mineralizados captables; en ese orden ideas la reglamentación da un porcentaje no obligatorio pero que, si otorga una cantidad destacable de los compuestos como el potasio, nitrógeno y el fósforo en el abono. Dentro de los análisis del fósforo se cuantifica en su forma mineral óxido de fósforo (P_2O_5) o fósforo asimilable que es la forma en la que se mide este elemento en los abonos, este elemento se clasifica como reportable, según la NTC, después de superar un valor de 1%. Por otro lado, está el contenido de nitrógeno que a diferencia del fósforo es evaluado midiendo el porcentaje presente de nitrógeno elemental que queda en el abono, dando como respuesta objetivo un valor por debajo del 1%. En el caso del producto obtenido en la finca el porcentaje obtenido demuestra que la mineralización si se llevó de una manera correcta y que la mayoría de nitrógeno se encuentra de forma relacionada que permite ser captada por el suelo y plantas.

El contenido de humedad puede variar según la proveniencia del material principal a compostar, en el caso de que sea vegetal el valor máximo sería de 35% y de origen animal de 20%. Como se indicó anteriormente la muestra de abono obtenida es proveniente de una mezcla de varios bultos de producto terminado; por lo que se podría decir que el resultado está estabilizado, de esta forma se puede concluir que el abono actual se encuentra con un desface de contenido de agua, como consecuencia de la ausencia de controles en la aeración de las pilas que maneja la finca.

La capacidad de intercambio catiónico es lo necesario para realizar el cambio de nutrientes a la planta por esta razón se tiene normalizada en un mínimo que se debe alcanzar para poder definir un abono útil. El abono generado actualmente tiene una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 29,96 cmol/kg que por aproximación está muy cerca a fallar en este aspecto, indicando deficiencia en la retención de nutrientes. La conductividad eléctrica determina la cantidad de sales presentes dentro del abono y no se tiene un dato establecido dentro de la norma, pero, según [34] se establece que el contenido inferior al 1 dS/m puede ser fitotoxicidad para las plantas para el cual sea usado.

La capacidad de retención de agua para el abono es determinada por la norma técnica colombiana (NTC); en esta se especifica que el fertilizante debe ser capaz de retener al menos su

propio peso, esto haciendo referencia en el análisis de laboratorio como el 100%, en este caso se cumplió la especificación con un valor de 236,58%.

De esta manera, se puede decir que el abono producido actualmente por la finca mirador de las Marías no cumple con el parámetro de humedad establecido en la NTC 5167 (20%) pues se obtiene un valor de 22,83%. Por otra parte, el contenido de fosforo se encuentra por debajo del límite inferior exigido por la norma (mayor al 1%), mientras la capacidad de intercambio catiónico se encuentra sobre el límite inferior establecido (mayor 30 cmol+/kg) pues arrojo un valor de 29,96 cmol+/kg; lo que permite deducir que el abono producido tiene una calidad baja, razón por la cual no reflejará los rendimientos esperados al ser aplicados en diferentes cultivos.

2.3.3. Interpretación de resultados para muestras de excretas

Antes de realizar cualquier tipo de transformación o estabilización se debe hacer una caracterización de las excretas en la que se identifique la relación carbono nitrógeno (C: N) de las mismas; puesto que de este parámetro depende la calidad del producto terminado. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA) la relación C: N es el parámetro más importante para iniciar un proceso de biodigestión o compostaje; si hay un exceso de carbono, es decir que sea superior a 35:1 la concentración del sustrato será muy elevada haciendo los microorganismos actúen lentamente y se enfrié el material. Por otra parte, “si hay un exceso de nitrógeno relación 15:1, el proceso tiende a calentarse excesivamente y genera malos olores por el amoniaco liberado.”[13]

Por esta razón se recolectó una muestra de las excretas generadas durante las actividades de ceba y engorde de los bovinos de la finca el mirador de las marías; con el fin de conocer la composición fisicoquímica y la relación C: N para determinar si requiere de la adición de un acondicionador que regule dicha relación indispensable para el desarrollo de las comunidades microbianas. Las características fisicoquímicas de las excretas están reportadas en la tabla 4.

Tabla 4.

Resultados fisicoquímicos de las excretas

Variable	Unidades	Resultados
Humedad	%	75,9
Carbono Orgánico Oxidable Total	%	6,88
Relación Carbono/Nitrógeno	Adimensional	17
Nitrógeno Total	%	0,402

Nota: resultados del análisis para una muestra de excretas bovinas recolectada dentro de los establos de la finca.

La interpretación de los resultados se realizó tomando como referencia los valores definidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA) en los manuales de compostaje del agricultor y manuales de producción de biogás y biofertilizantes por medio de la digestión anaerobia. En estos se sugiere que la materia prima debe entrar al proceso con un rango de relación C: N de “20:1 a 30:1 para la biodigestión”[23] y de “25:1 a 35:1 para el compostaje”[13]. De este modo, se puede deducir que la relación carbono nitrógeno de las excretas debe ser ajustada con la adición de reguladores para cualquiera de los dos métodos de obtención de abono pues se registró un resultado de 17:1 que se interpreta como bajo teniendo en cuenta los rangos de aceptación mencionados. Asimismo, se considera el porcentaje de humedad, 75,9%, no apto para la realización de abono compostado, debido a que el excede el límite máximo recomendado para este proceso. Sin embargo, se encuentra dentro del rango ideal para una biodigestión.

Por otra parte, la humedad es considerada como un factor crítico que se debe medir y controlar antes de iniciar el proceso, en el caso del compostaje la materia prima debe tener una humedad entre 45% a 60% mientras la biodigestión tiene un rango de humedad variable dependiendo del tipo de biodigestión que se desea realizar, este puede ir desde 65% a 75% cuando se habla de una digestión semi húmeda, de 76% a 100% para digestión húmeda y de 50% - 64% digestión seca [23].

La eliminación de microorganismos patógenos es factor importante para cualquiera de los procesos de obtención de abono, pues de esta forma se garantiza que el producto final esté libre de bacterias como *Salmonella spp*, *Escherichia coli* y *Listeria monocitogenes*, que pueden ser

transmitidas a los consumidores por medio de frutas, verduras, hortalizas y otros alimentos contaminados. Por tal motivo se solicitó un análisis de coprocultivo en el cual se evaluaría un cultivo bacteriano para determinar la presencia de coliformes fecales y patógenos, los resultados del análisis se muestran en la tabla 5.

Tabla 5

Resultados de análisis microbiológico de excretas

Análisis	Método	Detección	Resultado
Cultivo Bacteriano	Aislamiento e identificación	Bacterias de crecimiento regular, sin requerimientos nutricionales especiales	Negativo

Nota: Resultados de coprocultivo

Según los resultados entregados por el laboratorio de análisis clínico veterinario (ZOO LAB), luego de aislar e identificar las bacterias de crecimiento regular presentes en el cultivo bacteriano se determinó que no hay presencia de microorganismos patógenos gastrointestinales, por esa razón se registró un resultado negativo y no fue necesaria la elaboración de un antibiograma, estudio encargado de definir cuál debe ser el tratamiento antibiótico para eliminar los patógenos presentes en las excretas. Cabe destacar que se evidenció el crecimiento de enterobacterias consideradas como normales ya que se encuentran en el rumen del bovino.

De este modo se establece que no es necesario desarrollar un proceso de sanitización de la materia prima que se utilizará para la elaboración de abono orgánico y se garantiza la disponibilidad de microorganismos fermentativos que degraden la materia por acción enzimática.

2.4. Descripción de reguladores de la relación C:N

Como se documentó en el capítulo anterior es necesario calcular la relación carbono nitrógeno de la materia prima, con el fin de determinar si se debe ajustar o es adecuada para el

proceso. Existen algunos materiales que se adicionan a la materia prima para modificar la relación C: N hasta obtener un valor que se encuentre dentro del rango óptimo para iniciar el proceso de compostaje o biodigestión según sea el caso.

Los materiales que se usan como reguladores se clasifican de tres formas, los que tienen alto contenido de nitrógeno, los que tienen una relación carbono nitrógeno equilibrada y los que tienen alto nivel de carbono. La tabla 6 muestra recopila las relaciones C: N de algunos materiales de fácil obtención en el sector agronómico.

Tabla 6

Relación C: N de algunos materiales

Alto contenido de nitrógeno 1:1 A 24:1		C: N equilibrada 25:1 A 40:1		Alto contenido de carbono 41:1 A 1000:1	
<i>Material</i>	<i>C: N</i>	<i>Material</i>	<i>C: N</i>	<i>Material</i>	<i>C: N</i>
Purines frescos	5:1	Hojas de frijol	27:1	Paja de caña de azúcar	49:1
Gallinaza pura	7:1	Pulpa de café	29:1	Basura urbana	61:1
Desperdicios de comida	14:1	Hojas de plátano	32:1	Cascarilla de arroz	66:1
Restos de vegetales frescos	10:1 A 20:1	Restos de hortalizas	37:1	Paja de arroz	77:1
Césped	10:1 A 15:1	Hojas de café	38:1	Gramíneas	81:1
Humus	10:1	Restos de poda	44:1	Bagazo de caña de azúcar	104:1
Leguminosas	20:1 A 24:1	Desechos frutícolas	35:1	Mazorca de maíz	117:1

Nota: Clasificación de algunos materiales reguladores de la relación carbono nitrógeno. Los valores registrados fueron Tomados de: FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), *Manual de compostaje del agricultor*. 2013.

Existen otros elementos que se utilizan como reguladores de la relación carbono nitrógeno como el papel periódico, papel de oficina, aserrín y cartón que se clasifican como materiales con alto contenido de carbono. Sin embargo, para la construcción de la tabla 6 solo se tuvieron en cuenta los reguladores que se utilizan con mayor frecuencia en los procesos de compostaje y biodigestión, adicionalmente se consideró la disponibilidad de los mismos en el lugar donde se realizó la investigación.

Para seleccionar los reguladores de la relación carbono nitrógeno se debe aplicar la ecuación 2.

Ecuación 2

$$\text{Relación } C:N = \frac{(C:N_1 \times kg_1) + (C:N_2 \times kg_2) \dots + (C:N_n \times kg_n)}{kg \text{ totales}}$$

Donde C: N₁ corresponde a la relación carbono nitrógeno de la materia prima a la que se le desea aumentar o disminuir dicha proporción; C: N₂ es la relación carbono nitrógeno del regulador seleccionado; C: N_n es la relación carbono nitrógeno del enésimo regulador, si es necesario; kg₁, kg₂ y kg_n son las cantidades en kg que se van a utilizar de cada componente para llevar a cabo el proceso.

Si la materia prima que se va a utilizar en el proceso de producción de abono tiene una relación carbono nitrógeno entre 1:1 a 19:1; se debe adicionar un material con alto contenido de carbono para aumentar este valor. En el caso de utilizar gallinaza pura (7:1) se puede seleccionar el bagazo de caña (104:1) para elevar dicha relación, sin la necesidad de adicionar otro regulador. Otra alternativa es emplear dos o más reguladores que cuenten con una relación C: N equilibrada, como los desechos frutícolas, las hojas de plátano o los restos de poda.

Por otro parte, si la materia prima a manejar tiene una relación carbono nitrógeno mayor a 36:1 se deben emplear reguladores con alto contenido de nitrógeno, la cantidad a agregar de dicho regulador se establece dependiendo de qué tan elevada este la proporción. Suponiendo que se va a usar paja de arroz (77:1) se puede utilizar como regulador la gallinaza pura (7:1), teniendo en cuenta que para este caso particular se debe adicionar mayor cantidad de gallinaza para lograr disminuir la relación hasta un valor equilibrado.

Las excretas generadas en la finca mirador de las marías tienen una relación C: N de 17, valor que se encuentra por debajo de los rangos recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA) para iniciar un proceso de compostaje (25:1 a 35:1) o de biodigestión (20:1 a 30:1); por tal motivo se realizó la selección de un conjunto de reguladores que permitan obtener una relación C: N que sea aplicable para cualquiera de los dos procesos, es decir, que se encuentre en un rango de 25:1 a 30:1 que corresponden a los valores medios de los rangos establecidos para cada proceso. En la tabla 7 se muestran los reguladores sugeridos con los datos de la relación carbono nitrógeno encontrada en dos fuentes diferentes, el promedio de estos valores y la respectiva desviación estándar de los datos.

Tabla 7

Relación C: N de los reguladores propuestos

Regulador	Dato 1 relación C: N	Dato 2 relación C: N	Promedio de relación C: N	Desviación de los datos
Melaza de caña	70,4	67,29	68,845	1,6
Cascarilla de arroz	66	65	65,5	0,7
Aserrín	200	200	200	-
Restos de poda	44	40	42	2,82

Nota: Datos utilizados para calcular el promedio de la relación C: N de dos reguladores y su desviación respectiva.

Para seleccionar de los materiales reguladores se consideró que fueran fáciles de adquirir en la zona donde se realiza la investigación y con un costo bajo, teniendo en cuenta esto se eligió la cascarilla de arroz que en concepto general permite ser usada como fuente en cuerpo de carbono para los microorganismos como lo plantea la referencia [35] además dentro del proceso aerobio del compostaje funciona de manera en que permite el acceso de aire al cuerpo del montículo y por otro lado está la melaza de caña con el fin de darle un medio de cultivo ideal a las especies. “Mediante ensayos adecuados con soluciones diluidas de melazas, se ha demostrado que éstas, a pesar de su bajo contenido de fósforo, constituyen un buen medio nutritivo para muchos microorganismos, tales como levaduras, hongos y bacterias” [36]. “La melaza es catalogada como un acelerador finito que son sustancias que se añaden al suelo o a los residuos orgánicos para aumentar la velocidad de la mineralización de la materia orgánica del suelo o la de la

descomposición de los residuos” [37]. Si la relación carbono nitrógeno del material es demasiado baja y se requiere elevarla con una mínima cantidad en peso de regulador, se puede usar también el aserrín que tiene una relación alta, además de que este crea espacios en las pilas de compostaje o vermicompost permitiendo el acceso de aire. En conjunto con la poda de césped son residuos o subproductos de otros procesos, de esta manera se propone esta materia.

3. ANALISIS BIBLIOMÉTRICO

«El análisis de las publicaciones científicas es fundamental dentro de los procesos de investigación, razón por la cual, se ha convertido en una herramienta que permite calificar la calidad de las publicaciones de temas específicos. La bibliometría es una subdisciplina de la cienciometría y proporciona información sobre los resultados del proceso investigador, su volumen, evolución, visibilidad y estructura. Así permiten valorar la actividad científica y el impacto de la investigación y las fuentes.» [38]

En este capítulo se realizó un análisis de las publicaciones científicas relacionadas con los métodos de obtención de abono a partir de excretas animales; esto con el fin de determinar la disponibilidad de información referente a este tema teniendo en cuenta que los objetivos de esta investigación son teóricos. Para ello, se estudiaron los autores destacados, el número de publicaciones realizadas entre el año 2000 al 2021, las palabras clave establecidas a partir de un mecanismo de formulación de preguntas que se explicará a detalle en la metodología, y datos de los países con mayor número de publicaciones realizadas.

3.1. Materiales y métodos

Se utilizó el método de evaluación bibliométrico, con el cual se realizó el análisis cuantitativo de las fuentes proporcionadas por la base de datos Scopus que “Contiene más de 22000 títulos de más de 5000 editoriales de todo el mundo en los campos de la ciencia, tecnología, medicina, ciencias sociales y artes y humanidades. Scopus tiene más de 55 millones de registros que datan de 1823, el 84% de éstos contienen referencias que datan de 1996.”[39]. Adicionalmente, se caracteriza por ser una plataforma con múltiples artículos con acceso libre.

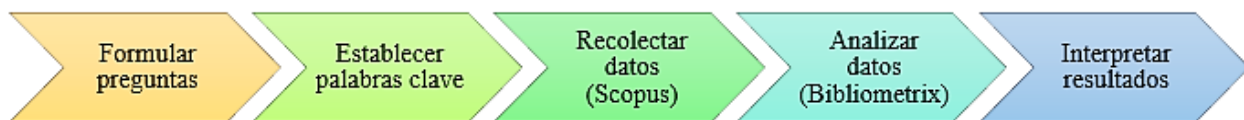
A pesar de que Scopus permite realizar un análisis bibliométrico en su plataforma online, no se pueden seleccionar los indicadores bibliométricos, instrumentos que permiten determinar el crecimiento de cualquier área científica. Por tal motivo, se usó el software Bibliometrix con su interfaz Biblioshiny, del cual se extrajeron datos estadísticos respaldados por gráficas y tablas que describían el crecimiento del área científica de interés para esta investigación, teniendo en cuenta

la producción anual, el crecimiento de las fuentes, los autores, las palabras clave establecidas en los documentos y la producción por países.

3.2. Metodología

El planteamiento de la metodología se realizó tomando como referencia la técnica empleada por [40], en la cual se emplea Scopus como herramienta de búsqueda de publicaciones científicas, utilizando palabras clave y operadores booleanos como AND y OR ; mientras Bibliometrix se usa para analizar estadística y cuantitativamente los resultados obtenidos en Scopus. Las etapas de formulación de metodología se muestran en la figura 14, en la cual se puede observar que el primer paso a seguir consiste en formular preguntas que permitan establecer las palabras clave que se van a ingresar en la plataforma Scopus, esto con el fin de ejecutar varias búsquedas limitadas al campo de investigación, que en este caso es, métodos de obtención de abono a partir de excretas animales. De este modo, los datos recolectados en Scopus se cargan en el software Bibliometrix para generar y analizar las gráficas de producción científica anual, crecimiento de las fuentes, palabras claves de los autores y producción por países. Finalmente, se deben interpretar los resultados generales obtenidos.

Figura 14
Metodología de análisis Bibliométrico



Nota: En esta figura se muestran de manera gráfica los pasos que se seguirán para desarrollar la metodología propuesta.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se formularon las tres preguntas que se enlistan a continuación:

- ¿Cuáles productos se relacionan a la biodigestión?
- ¿Valoración de las excretas animales en el proceso de digestión?
- ¿Cuáles son los procesos de producción de fertilizantes a partir de excretas?

Una vez resueltas las preguntas se formularon cinco ecuaciones de búsqueda en las que se relacionaron palabras claves a través de operadores booleanos obteniendo los siguientes resultados:

- Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas
- “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”
- Manure AND “Fertilizer production”
- Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”
- “Organic waste recycling” AND Agricole

Se consideraron solamente documentos en los idiomas inglés y español excluyendo los otros idiomas presentados por Scopus antes de realizar la descarga de los paquetes de datos, teniendo en cuenta que la mayor parte de información se encuentra en inglés, idioma interpretable por parte de los investigadores. De igual forma, se filtraron los resultados según el tipo de documento limitando la búsqueda a fuentes citables como artículos publicados en revistas de investigación, libros y fragmentos de los mismos. Finalmente, se seleccionaron todas las colecciones encontradas por Scopus y se exportaron como formato “bib”, para cargarlas a la interfaz de Biblioshiny del software Bibliometrix y realizar el análisis estadístico de producción científica. Este procedimiento se aplicó para cada ecuación de búsqueda.

3.3. Análisis de resultados

El análisis de resultados que se muestra a continuación corresponde a la ecuación Manure AND “Fertilizer production”. Se eligió esta ecuación teniendo en cuenta que es la que tiene un vínculo estrecho con el cumplimiento del objetivo general propuesto en esta investigación. Cabe aclarar que el análisis se desarrolló para todas las ecuaciones establecidas en la metodología; Sin embargo, la interpretación de los resultados se muestra de manera sintetizada en el apéndice 3.4.

- Análisis bibliométrico descriptivo: la aplicación de la ecuación mencionada anteriormente permitió recolectar en la plataforma de Scopus noventa y un (91) documentos publicados en un periodo de tiempo de 1985 a 2021. No obstante, se filtraron los resultados analizando los documentos publicados entre el año 2000 y el 2021, con el fin de interpretar los datos de las publicaciones realizadas en los últimos veinte (20) años. En la tabla 8 se puede evidenciar la

información general del análisis estadístico extraído de Biblioshiny; en esta se agrupan los datos de mayor relevancia como el número total de documentos publicados, el periodo de tiempo evaluado, las palabras clave, los autores y los índices de colaboración. La información general de las otras ecuaciones propuestas se encuentra en el anexo 1.

Tabla 8
Información principal de la bibliometría

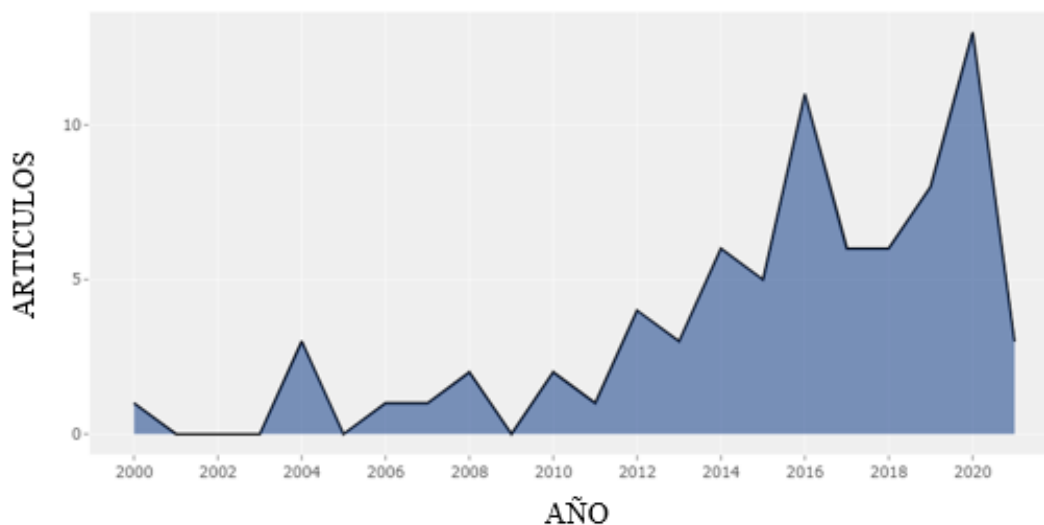
Información principal sobre los datos	Explicación	Número
Documentos	Número total de documentos	76
Fuentes	Distribución de frecuencia de las fuentes como revistas	54
Palabras clave de autores	Número total de palabras clave	287
Palabras clave Plus (ID)	Número total de frases que aparecen con frecuencia en el título de las referencias de un artículo	871
Periodo	Años de publicación	2000-2021
Autores	Número total de autores	362
Apariciones de autores	Distribución de frecuencia de los autores	377
Documentos de un solo autor	Numero de autores únicos por artículo	2
Documentos con varios Autores	Numero de varios autores por artículo	360
Autores por documento	Numero promedio de autores en cada documento	4,76
Coautores por documento	Numero promedio de coautores en cada documento	4,96
Índice de colaboración	Numero de varios autores por artículo/Número total de artículos con varios autores	4,86

Nota: Recopilación de información por Bibliometrix acerca de la ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”.

- Producción científica anual: Los resultados estadísticos conseguidos con el software Bibliometrix permiten evidenciar una tasa de crecimiento anual del 7,11% a partir del año 2010. La gráfica mostrada en la figura 15 exhibe el comportamiento de la producción científica anual en un periodo de 20 años comprendido entre el año 2000 y el 2020; ciclo en cual se observa una

producción nula entre los años 2002 y 2003. Sin embargo, se presentó un crecimiento importante en los últimos dos años, pues en el año 2018 se publicaron 6 documentos mientras en el 2020 se divulgaron 13. Lo que permite afirmar que, aunque el número de publicaciones relacionadas con la ecuación principal es bajo en comparación con otras temáticas de investigación, el interés por los temas de residuos y producción de abonos se encuentra en constante crecimiento; esto debido a que se puede considerar como un tema de interés relativamente nuevo, pues solo se encontraron publicaciones a partir del año 1985 teniendo un número de 15 publicaciones entre 1985 y 1999, año en el que se realizaron 7 publicaciones. Cabe destacar que las gráficas correspondientes a las cuatro ecuaciones restantes, se pueden encontrar en el anexo 2.

Figura 15
Producción científica anual

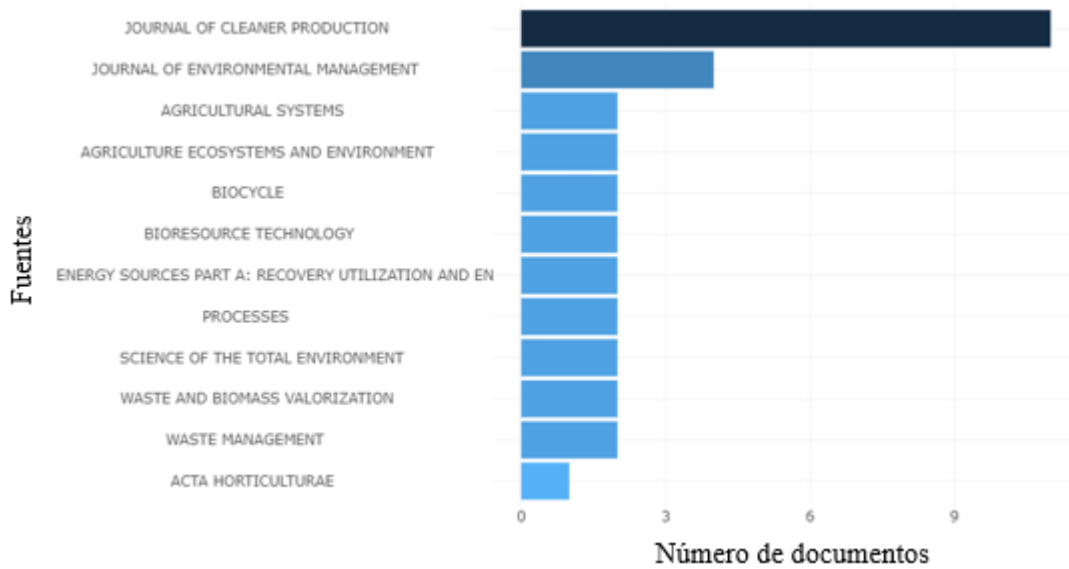


Nota: Grafico obtenido en el software Bibliometrix que muestra el crecimiento del número de artículos por año para la ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”.

- Fuentes científicas: Se evaluó la cantidad de documentos divulgados por las fuentes a través de los 20 años, esto representado de manera gráfica en la figura 16, donde se pueden observar las doce (12) fuentes con mayor número de publicaciones entre las cuales se encuentra encabezando la lista la revista “Journal of cleaner production” con once (11) publicaciones realizadas entre el año 2000 y el 2020; en segundo lugar se encuentra la revista “ Journal of environmental

management” con un total de cuatro (4) artículos publicados; las otras fuentes que se pueden visualizar en la gráfica cuentan con un total de dos (2) artículos publicados. En este análisis de identificaron cincuenta y cuatro (54) fuentes de las cuales cuarenta y tres (43) cuentan con solo un documento divulgado.

Figura 16
Fuentes más relevantes



Nota: Lista de fuentes relevantes según su número de publicaciones obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”.

- Autores: En este caso se identificó el top 15 de los autores más destacados teniendo en cuenta el número de citas que recibe este por año y la producción de documentos registrada a través del tiempo. De este modo, se encontró que el autor “Zhao L” cuenta con tres artículos publicados en los años 2014, 2019 y 2020, siendo el artículo publicado en el año 2019 el más citado dentro de los 71 documentos analizados, reportando un índice de diez (10) citas por año. Por otra parte, los autores “Makara A” y “Kowalski Z” registran cada uno un total de dos (2) artículos publicados en los años de 2018 y 2019 con un índice de citación de siete (7) citas por año para la primera publicación. En anexo 3, se puede encontrar la gráfica de producción de los autores a través del tiempo.

- Palabras claves de los autores: El software permite agrupar y esquematizar un conjunto de palabras, siendo esta parte de las más repetidas dentro de los documentos especificados para la búsqueda. En la figura 17 se muestran 50 palabras claves donde las de mayor tamaño en fuente reflejan el número de reincidencias y el nivel de importancia en general. De esta manera es fácil identificar cuáles son los temas que más se trataron a lo largo de la mayoría de investigaciones y a su vez poder relacionar si el trabajo y las bases de datos van en el mismo camino.

Figura 17

Nube de palabras claves



Nota: Predominancia de las palabras claves según los autores obtenido en el software Bibliometrix para ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”.

- Producción por países: Con este indicador bibliométrico se lograron identificar los países que se destacan por tener el mayor número de publicaciones y citas relacionadas con el tema de desechos y producción de fertilizantes. La tabla 9 permite apreciar el top 15 de los países con mayor número de documentos publicados y el top 15 de los países con mayor número de citas. De este modo, se evidenció que China es el país con mayor producción contando con

veintiséis (26) documentos publicados, seguido por Estados Unidos con veinte (20) publicaciones y Alemania con un total de trece (13) artículos, divulgados en el periodo comprendido entre el año 2000 y el año 2020. Sin embargo, cinco de los países que se catalogan como países con mayor número de publicaciones no figuran en la lista de los más citados, como es el caso de Polonia y Turquía, esto debido a que en estos países el tema de investigación no tiene un interés predominante o la calidad del contenido de la publicación es baja en comparación con los de otros países.

Los países con mayor número de citas son Estados Unidos (283), Holanda (210) y el Reino Unido (150). Por otra parte, China cuenta con un total de ciento veinticuatro (124) citas, ubicándolo en la quinta posición dentro del top 15 de los países más citados indicando que a pesar de ser el país con mayor número de artículos publicados, no son los más consultados y referenciados en otras investigaciones, comportamiento que se puede atribuir a la accesibilidad o la calidad de las publicaciones.

Tabla 9
Producción por países

Número de artículos publicados por país		Número de citas por país	
<i>País</i>	<i>Artículos</i>	<i>País</i>	<i>Total, citas</i>
China	26	Estados Unidos	283
Estados Unidos	20	Holanda	210
Alemania	13	Reino Unido	150
Irán	11	Dinamarca	125
Polonia	11	China	124
Holanda	8	Canadá	114
Austria	7	Alemania	81
Finlandia	7	Finlandia	78
Italia	7	España	66
España	7	Malasia	60
Turquía	7	Bélgica	41
Bélgica	6	Portugal	41
Canadá	6	Francia	33
Dinamarca	6	Brasil	28
Francia	6	Suecia	22

Nota: Recopilación de la información de producción científica por países de 2000 a 2020 obtenida con Bibliometrix para la ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”.

3.4. Síntesis de resultados

El análisis bibliométrico realizado para las cinco (5) ecuaciones de búsqueda descritas en la metodología permitió obtener los resultados mostrados en la tabla 10; en la cual se pueden encontrar los indicadores como el número de documentos publicados, fuentes, autores, palabras clave de los autores, país con mayor producción y país más citado, todo esto evaluado en un periodo de tiempo comprendido entre el año 2000 y el año 2021. Cabe aclarar que para el año 2021 la base de datos Scopus cuenta los artículos publicados a la fecha y los que esta próximos a ser divulgados.

Tabla 10
Resumen de resultados generales de las ecuaciones de búsqueda

Ecuación de búsqueda	Documentos	Fuentes	Autores	Palabras claves de los autores	País con mayor producción	País más citado
Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas	93	69	413	269	Brasil	Brasil
“Anaerobic digestion” AND “Animal manure”	335	174	1193	863	Estados Unidos	Estados Unidos
Manure AND “Fertilizer production”	76	54	362	287	China	Estados Unidos
Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”	382	215	1305	1125	Estados Unidos	España
“Organic waste recycling” AND Agricole	35	29	167	134	India	Dinamarca

Nota: La tabla presenta un conjunto resumen de los datos obtenidos por cada una de las búsquedas realizadas en la bibliometría.

Con ayuda de la plataforma Scopus y el software Bibliometrix, se logró encontrar un total de 921 documentos relacionados con las ecuaciones de búsqueda establecidas, estos fueron

publicados por 541 fuentes diferentes, correspondientes a libros, secciones de libros y revista científicas en su gran mayoría. La ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure” fue la que obtuvo un mayor número de documentos con un valor de 382 artículos publicados, 215 fuentes, 1305 autores, 1125 palabras clave por autor, un índice de producción científica mayor en Estados Unidos y con España posicionado como el país con mayor número de citas. De este modo, se puede deducir que existe mayor interés por los temas de investigación relacionados con los desechos animales, el compostaje, el vermicompost y la biodigestión. Adicionalmente, se considera que temas como la biodigestión anaerobia de las excretas animales tienen una tendencia creciente de investigación, pues hasta la fecha cuenta con 335 artículos divulgados y una producción científica marcada en el país de Estados Unidos pues cuenta con 136 divulgaciones y 2694 citas.

En cuanto a la producción por países se notó que Estados Unidos está presente en el top 15 de los países con mayor número de documentos publicados, evaluados para todas las ecuaciones de búsqueda, posicionándolo como el país con mayor producción científica, es decir, que muestra un notorio crecimiento en los temas de investigación relacionados en cada una de las ecuaciones de búsqueda propuestas.

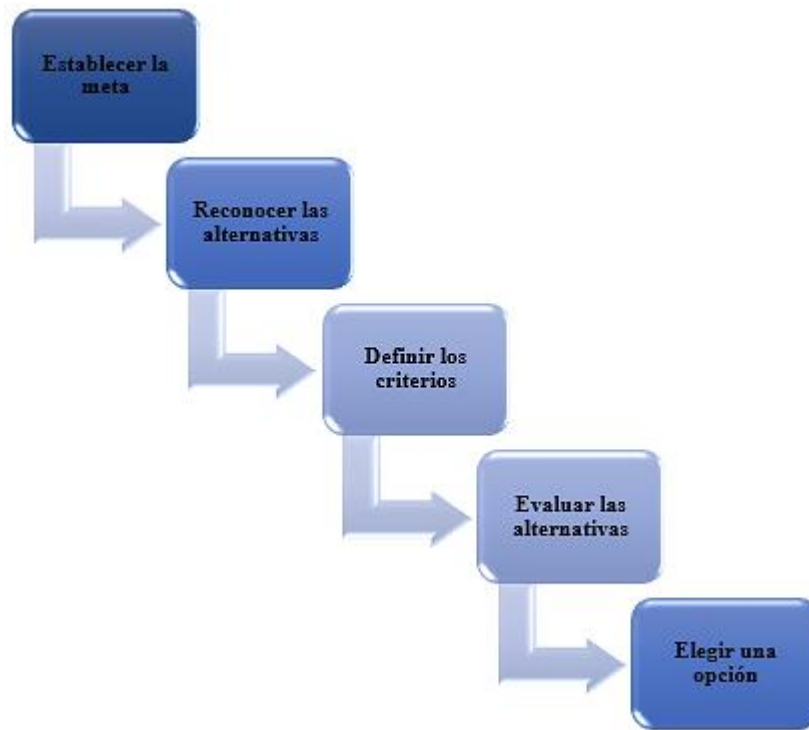
4. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE ABONO

Para implementar un proceso de producción se deben evaluar los métodos y procedimientos registrados en la literatura, patentes o investigaciones, por tal motivo es importante buscar recursos que permitan analizar cuál de las metodologías es viable o realmente aplicable. Las herramientas que se usan para la selección de métodos se caracterizan por ser modelos lógicos o matemáticos que el investigador aplica a partir de la selección de unos criterios cuantitativos o cualitativos, que facilitan la elección de una alternativa.

El proceso de jerarquía analítica AHP (Analytic Hierarchy Process) es una metodología estructurada para la toma de decisiones que «funciona desarrollando prioridades para las alternativas y los criterios utilizados para juzgar las alternativas. Los criterios son seleccionados por un responsable de la toma de decisiones. Los criterios seleccionados pueden medirse en diferentes escalas, como el peso y la longitud, o incluso pueden ser intangibles para los que aún no existen escalas. Las mediciones en diferentes escalas, no pueden combinarse directamente. En primer lugar, se determinan las prioridades de los criterios en función de su importancia para alcanzar el objetivo y, a continuación, se determinan las prioridades de los resultados de las alternativas en función de cada criterio. Estas prioridades se obtienen a partir de evaluaciones por pares mediante juicios o cocientes de medidas de una escala, si existe. El proceso de priorización resuelve el problema de tener que lidiar con diferentes tipos de escalas, interpretando su significado para los valores del usuario o usuarios. Por último, se utiliza un proceso de ponderación y adición para obtener las prioridades globales de las alternativas en función de su contribución al objetivo. Esta ponderación y adición es paralela a lo que se habría hecho aritméticamente antes del AHP para combinar alternativas medidas según varios criterios que tienen la misma escala para obtener un resultado global»[41]. En la figura 18 se pueden evidenciar de forma concisa los pasos que se deben seguir a la hora de desarrollar el proceso de jerarquía analítica (AHP).

Figura 18.

Proceso de jerarquía analítica (AHP)



Nota: etapas que se deben seguir para realizar un análisis de jerarquía analítica con múltiples criterios.

Para la elección de una de las alternativas de producción de abono a partir de excretas bovinas se implementó el proceso de análisis jerárquico AHP, debido a que permite tomar decisiones soportadas en los resultados de la evaluación de unos criterios cuantitativos y cualitativos identificados por los investigadores, a los cuales se les asignó una ponderación según la opinión de varios expertos; a continuación, se describen las etapas y las conclusiones obtenidas para cada una de ellas.

4.1. Identificación de las alternativas de producción de abono.

Durante la revisión bibliográfica se reconocieron dos métodos principales de producción de abono a partir de excretas bovinas, llamados biodigestión y compostaje. Cada uno de estos tiene distintas maneras o técnicas para llevar a cabo el proceso. Aunque el principio de degradación

microbiológico es el mismo se conocen varios tipos de compostaje y biodigestión, clasificados según el grado de tecnificación de los equipos, la dificultad de construcción y manejo de los mismos.

Existen varios métodos para realizar compostaje, la diferencia entre estos radica en la forma como se quiera mantener el cuidado del montículo. Como se ha nombrado en capítulos anteriores el compostaje se puede desarrollar de distintas maneras, desde tanques, hileras o descomposición a partir del metabolismo de las lombrices, todos estos procesos se basan en el mismo concepto de digestión aerobia, haciendo necesaria la presencia del oxígeno constantemente, además de requerir un determinado espacio para la construcción de estos. Por otro lado, los mecanismos de biodigestión implementados en las zonas agrícolas para el aprovechamiento de las excretas animales, se caracterizan por ser estructuras de fácil construcción y operabilidad; entre estos se encuentran los digestores taiwaneses, digestores de cúpula fija (chino), digestores de cúpula móvil (hindú) y digestores de operación batch. La elección de alguna de estas técnicas depende del espacio disponible para la construcción, la topografía del lugar y la capacidad de inversión para poner en marcha el sistema de producción de abono.

De este modo, se llevó a cabo una depuración de las técnicas de biodigestión y compostaje nombradas anteriormente, con el fin de considerar dentro de la matriz de selección aquellas que sean aplicables en la finca el mirador de las marías. Para el proceso de compostaje se deben descartar las extensas hileras de materia ya que no se dispone de un área plana para su implementación; asimismo los procesos de compostaje en tanques ya que es una tecnología especializada para realizar abono de manera industrializada, además este método usa aireación forzada cosa que la finca no estaría dispuesta a proporcionar porque sería un costo adicional de producción, por tal motivo se debe optar por hacer pilas pequeñas o vermicompost. Por otra parte, en el proceso de biodigestión se descartaron algunos métodos teniendo en cuenta las “restricciones de ubicación física del sistema y las consideraciones previas a la realización de la obra civil tales como el desnivel, tipo de terreno, profundidad del manto freático (mínimo 7 m) y probabilidad de fractura o falla geológica.” [42] De esta manera, se excluyeron los biodigestores de tipo chino e hindú, pues como se mencionó en el apéndice 1.3.1 estos deben ser construidos de forma subterránea, en un terreno que cumpla las restricciones anteriormente mencionadas. Para ello se tuvieron en cuentas las siguientes consideraciones; la finca miradora de las marías se encuentra

situada en un terreno montañoso quebrado con actividad sísmica intermedia como se muestra en la figura 19. Además, en una publicación realizada por el IGAC se “indicó que toda la zona montañosa del departamento de Cundinamarca, cuenta con suelos ya catalogados bajo amenaza por poder presentar derrumbes.”[43]

Figura 19

Mapa de sismicidad



Nota: La zona de color verde según el autor es un área con sismicidad intermedia con presencia predominante de fallas. Tomado de: M. Q. Dalila Ferro, *Planeta Azul: Geografía e Historia Visualizada*, tercera ed., Bogotá: I Gema, 1998.

Tomando como referencia lo descrito anteriormente se realizó una segmentación de tecnologías, donde solamente se tuvieron en cuenta las que son realmente aplicables en la finca. Para ello, se conformaron dos grupos de metodologías de producción de abono (compostaje y biodigestión). Dentro del grupo del compostaje se seleccionaron las alternativas de compostaje en pilas y el vermicompost. En el mecanismo de biodigestión se escogieron dos vías de producción, el reactor de digestión batch y el reactor taiwanés. Cabe destacar que estas dos últimas alternativas se consideraron teniendo en cuenta los requerimientos de la finca, pues los propietarios sugirieron evaluar procesos en los que se obtuviera como producto biol (abono líquido), necesario para realizar fertilización por aspersión de los forrajes (pastos para ceba).

Con el propósito de sintetizar la información acerca de estos procesos, en la tabla 11, tabla 12, tabla 13 y tabla 14 se destacan las principales ventajas y desventajas de cada alternativa de producción de abono que se van a comparar mediante el proceso de análisis jerárquico AHP.

Tabla 11

Ventajas y desventajas del proceso de compostaje por hileras

Ventajas	Desventajas
Manera económica de realizar fertilizante luego del diseño estructural del espacio en el que se va a realizar.	Un proceso que debe estar constantemente en revisión para mantener la digestión aerobia.
Se eliminan los malos olores por la descomposición de elementos volátiles presentes.	Si la pila no tiene un control continuo del volteo, se romperá la capa superficial endurecida que dejará liberar malos olores y gases provenientes del centro de la pila que empezaba a trabajar en ausencia de oxígeno.
Hay una eliminación total de patógenos por presencia de una fase termófila que garantiza la eliminación de estos agentes por las altas temperaturas logradas.	Se restringen con un tamaño determinado ya que, si son de una proporción o tamaño grande, su volteo y revisión se tendrá que hacer de manera más continua y en algunos casos hasta se deben usar maquinaria especializada como retroexcavadora.

Nota: Identificación de ventajas y desventajas del proceso de compostaje por hileras.

Tabla 12.*Ventajas y desventajas del proceso de Vermicompost*

Ventajas	Desventajas
Reducción de elementos pesados y tóxicos presentes en los residuos, ya que gran parte de estos se quedan en residencia dentro del cuerpo de las lombrices.	Al no haber una etapa termófila durante el proceso, es posible que microorganismos patógenos se mantengan presente al obtener el producto húmico.
Los gases de efecto invernadero son menores en este proceso comparado a los otros procesos de compostaje.	La temperatura optima de la especie esta entre los 15 °C a 25 °C, situación que afecta el uso de esta tecnología en territorios cálidos.
Proporciona una mayor capacidad de retención de humedad, mejor capacidad de retención de nutrientes en los suelos agrícolas.	Se requiere de un tiempo adicional para estabilizar los desechos, además de que se requiere de constante aeración para mantener las condiciones aeróbicas.

Nota: Identificación de ventajas y desventajas del proceso de compostaje vermicompost.

Tabla 13.*Ventajas y desventajas reactor batch*

Ventajas	Desventajas
El volumen que ocupa es mucho menor que el de los otros digestores.	En lugares donde se genera una cantidad de desechos grande es necesario implementar varios tanques.
El consumo de agua durante el proceso es bajo.	
No presenta cambios bruscos de temperatura.	
La operabilidad es sencilla, porque no requiere alimentación continua	No presenta un rendimiento satisfactorio para la producción de biogás, pero si para el bioabono.
Permite obtener fertilizantes líquidos y sólidos de alto rendimiento y calidad	

Nota: Identificación de las ventajas y desventajas en el proceso de digestión batch

Tabla 14
Ventajas y desventajas reactor Taiwanés

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de construcción Fácil transporte e instalación. [44]	Su material de construcción es susceptible a perforaciones.[44]
Construcción horizontal y plana que favorece en los lugares con alto nivel freático.[44]	Vida útil en promedio del digestor es de 5 años.
La acción de carga y descarga se puede realizar sin necesidad de pausar el proceso.[45]	Se requiere de un área protegida en el terreno para evitar un daño significativo rápido en la membrana.

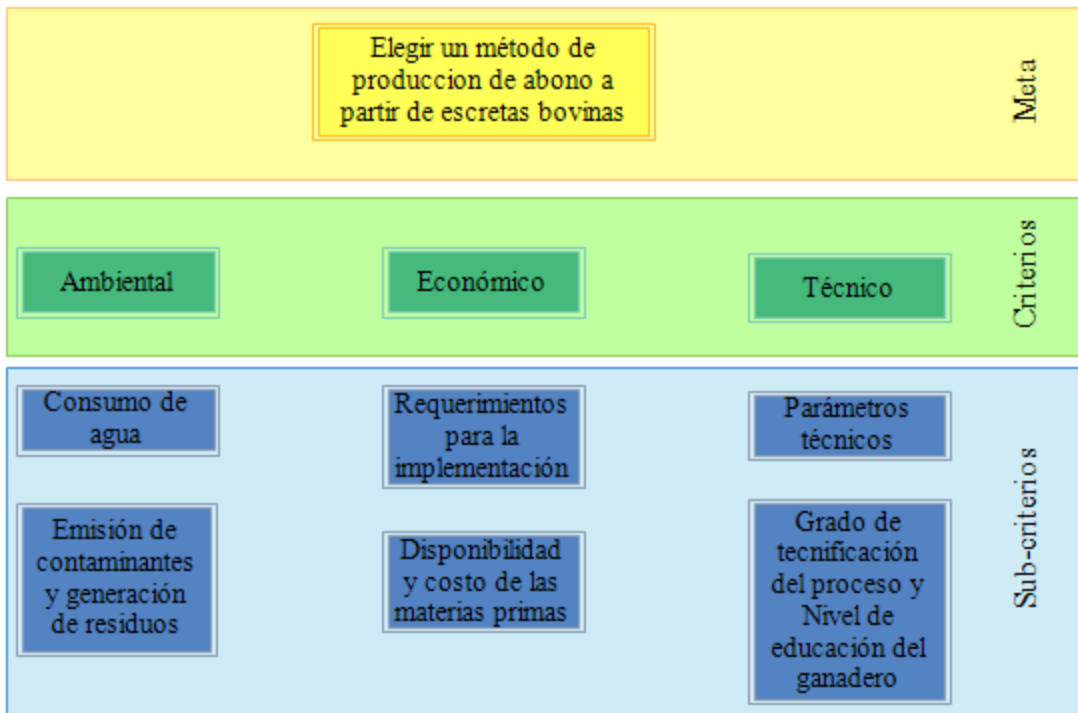
Nota: Identificación de las ventajas y desventajas en el proceso de digestión Taiwanés.

4.2. Identificación de los criterios de evaluación.

Para llevar a cabo el análisis de jerarquía analítica AHP se fijaron unos criterios que permitieron evaluar la aplicabilidad de cada una de las alternativas. Estos criterios se establecieron teniendo en cuenta la revisión bibliográfica de los métodos de obtención de abonos (biodigestión y compostaje); así como las desventajas y ventajas de las alternativas mencionadas en el apéndice 4.1. De este modo se desarrolló una estructura jerárquica mostrada en la figura 20.

Figura 20

Organización jerárquica de los criterios



Nota: representación gráfica de la jerarquización de los criterios que se van a evaluar.

Para establecer esta jerarquización se tuvieron en cuenta los pilares principales del desarrollo sostenible entre los cuales se eligieron dos, el criterio ambiental y el criterio económico; adicionalmente se fijó un criterio técnico esto con el fin de alcanzar la meta de elegir un método de producción de abono a partir de excretas bovinas. De este modo, se seleccionó un grupo de seis (6) subcriterios representativos que respalden cada uno de los criterios mencionados anteriormente. Este análisis se realizó teniendo como soporte la referencia [46].

La calificación y asignación de pesos se realizó para cada uno de los subcriterios debido a que estos son los que permiten comparar satisfactoriamente cada una de las cuatro (4) alternativas en las matrices de selección sugeridas por el método de jerarquización AHP. A continuación, se justifica la elección de cada subcriterio.

- Criterio de consumo de agua: El agua es un recurso escaso que puede presentar desabastecimiento en el futuro si no se hace una adecuada gestión como se indica en la ISO 14001 y en la ISO 14046 que tiene como principal objetivo evaluar los impactos ambientales de los procesos sobre el agua. Por otra parte, el decreto 1090 de 2018 que “tiene por objeto reglamentar la Ley 373 de 1997 en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua (UEAA)”[47], establece que todos los proyectos deben cumplir con este programa y con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Una de las tendencias durante la implementación de procesos sostenibles es la disminución del consumo de agua y el uso responsable de los recursos hídricos, “trayendo como consecuencia el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de reducir el consumo de agua y disminuir el coste por la disponibilidad del servicio.”[48] Por tal motivo, se consideró el consumo de agua como un criterio de selección para evaluar cada una de las alternativas frente a este importante factor.

- Criterio de emisión de contaminantes y generación de residuos: Para seleccionar un método de producción de abono es importante considerar los impactos ambientales que se pueden generar al implementar dicha alternativa. Uno de los criterios que se deben tener en cuenta en a la hora de evaluar un proceso productivo, según la resolución 1519 del 26 de julio de 2017 [49], es la emisión de contaminantes como material particulado, gases de efecto invernadero y malos olores debido a que se consideran potenciales contaminantes atmosféricos que deben contar con un plan de contingencia para evitar la afectación del aire y de las comunidades cercanas al sitio donde se desarrolla el proceso.

Por otra parte, se debe apreciar la generación de residuos sólidos y líquidos en cada una de las alternativas estudiadas, puesto que cada uno de estos debe contar con un plan de manejo y disposición final con el fin de evitar afectación de fuentes hídricas, suelo, aire, fauna y flora.

- Criterio de parámetros técnicos: Los parámetros técnicos son condiciones que se deben medir y controlar durante un proceso para obtener rendimientos satisfactorios. Se puede considerar que un proceso productivo o de transformación aumenta su grado de complejidad cuando se debe monitorear un número elevado de parámetros técnicos, puesto que al tener un número mayor de variables se deben implementar lazos de control robustos que requieren de equipos de instrumentación y control especializados. Por tal motivo, se introdujo el criterio de parámetros

técnicos dentro de la evaluación de las alternativas de producción de abono, con el fin de identificar la cantidad de parámetros se deben manejar, la frecuencia de monitoreo y la dificultad para controlar cada uno de estos.

- Criterio de grado de tecnificación del proceso y nivel de educación del trabajador: Este criterio se estableció teniendo en cuenta que los dueños de la finca buscan implementar una alternativa de fácil manejo que pueda ser manipulada por una persona a la cual no se le exija un nivel de educación específico, es decir, que se pueda contratar una persona con bajo nivel de educación o poca experiencia en el tema con el fin de capacitarla para que se dedique exclusivamente a ejecutar y supervisar el proceso. Por esta razón, se asoció el grado de tecnificación con el nivel de educación del ganadero, puesto que, al seleccionar un método de producción de abono con un grado de tecnificación alto se deben montar equipos especializados con instrumentación compleja que deben ser manipulados por personas con conocimientos específicos que les permitan llevar a cabo el proceso y resolver o mediar fallos eventuales. Adicionalmente, “El nivel de educación está directamente relacionado con las habilidades de los ganaderos para adoptar oportunamente prácticas de gestión sostenible y promover con éxito el uso de tecnologías modernas.”[46]

- Criterio de disponibilidad y costos de la materia prima: Antes de implementar un método de producción se debe considerar la disponibilidad y el costo de las materias primas que requiere el proceso de fabricación. La disponibilidad de las materias primas se debe analizar teniendo en cuenta que esta puede ser constante o estacionaria, es decir, que solo se puede obtener en determinadas épocas del año. Adicionalmente, se debe considerar que el insumo requerido debe ser comercializado por más de un proveedor, con el fin de tener un respaldo en caso de que el proveedor seleccionado no cumpla con la demanda. Un factor que se debe considerar en la evaluación de costos de las materias primas es el costo de transporte, el cual debe ser asumido por el comprador y fluctúa dependiendo de la distancia que debe recorrer el insumo para ser llevado a su lugar de destino, la cantidad solicitada y la cantidad de despachos que se realicen en un periodo de tiempo determinado.

- Criterio de requerimientos para la implementación: En la implementación de un proyecto se debe tener un sentido lógico, teniendo un seguimiento de unas preguntas iniciales que se plantean

y entre una de ellas está el dónde. “La localización de un proyecto es el lugar en donde se realizará. Por otra parte, el proyecto también debe señalar cuál es su cobertura espacial, es decir, se debe indicar la zona que cubrirá el proyecto, los lugares próximos al lugar de ejecución del proyecto que también se beneficiarán del mismo.”[50] Con lo anterior se quiere hacer referencia que las propuestas deben tener presentes el lugar en el que desea hacer la implementación, así de esta manera descartar tecnologías o dimensionar de manera correcta el proyecto. Además, se debe tener un presupuesto. “El presupuesto en sí, es un plan básicamente numérico que se anticipa a las operaciones que se pretenden llevar a cabo; para la obtención de resultados razonablemente correctos.”[51] junto a este presupuesto desenlazan unas cuestiones adicionales, determinando en que se puede invertir, esto enfocado en la obtención de tecnologías de control, equipos, construcción o modificación del lugar de instalación y hasta en la evaluación de las materias primas que se deban de usar dentro del trabajo así limitando el proyecto en la búsqueda de alternativas cómodas y viables para el desarrollo.

4.3. Diseño y estructuración de la encuesta basado en los criterios.

Con los criterios seleccionados se estructuró una encuesta por evaluación de pares con quince (15) puntos de selección múltiple con única respuesta, correspondientes a el número de parejas posibles que se podían formar entre los seis (6) criterios mencionados en el apéndice 4.2. Esto con el fin de darle un nivel de importancia a un criterio A sobre uno B o viceversa, para ello “se suele utilizar alguna escala conocida para concentrar el juicio de manera efectiva formando pares de elementos y compararlos respecto a una sola propiedad sin preocuparse de las otras propiedades o de otros elementos.”[52]

Para esta investigación se empleó la escala fundamental de comparación por pares de Saaty, en la encuesta se manejó la tabla 15, en la cual solo se tuvieron en cuenta las calificaciones de tipo cualitativo.

La encuesta fue desarrollada en un software online especializado para realizar formularios de Google. Para ello, se formularon quince (15) preguntas en las cuales los encuestados podían comparar dos criterios frente a la escala fundamental de comparación mostrada en la tabla 15. La figura 21 muestra la escala de comparación cualitativa para los criterios de consumo de agua y emisiones, esta se encuentra dividida en dos secciones separadas por una calificación llamada

“igual”; en el costado derecho se encuentran las calificaciones que se le pueden asignar al criterio de consumo de agua en caso de que el encuestado considere que este tiene mayor importancia sobre el criterio de emisiones. De lo contrario al costado izquierdo se puede apreciar la escala de calificación para el criterio de emisiones.

Tabla 15
Niveles de importancia

Definición	Comentarios
Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B.
Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B.
Importancia fuerte	El criterio A es más importante que el B.
Importancia muy fuerte	El criterio A es mucho más importante que el B.
Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B esta fuera de toda duda.

Nota: Definición de los valores para calificar los criterios con su respectiva equivalencia cualitativa y comentario que muestra un ejemplo de lo que representa cada valor.

Figura 21
Diseño de pregunta para la encuesta

1. Asigne una calificación a el par de criterios que aparecen posteriormente, teniendo en cuenta Escala fundamental de comparación por pares de Saaty. *

Extrema (Emisiones) Muy fuerte (Emisiones) Fuerte (Emisiones) Moderado (Emisiones) Igual Moderado (Consumo de agua) Fuerte (Consumo de agua)

Emisiones VS consumo de agua

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

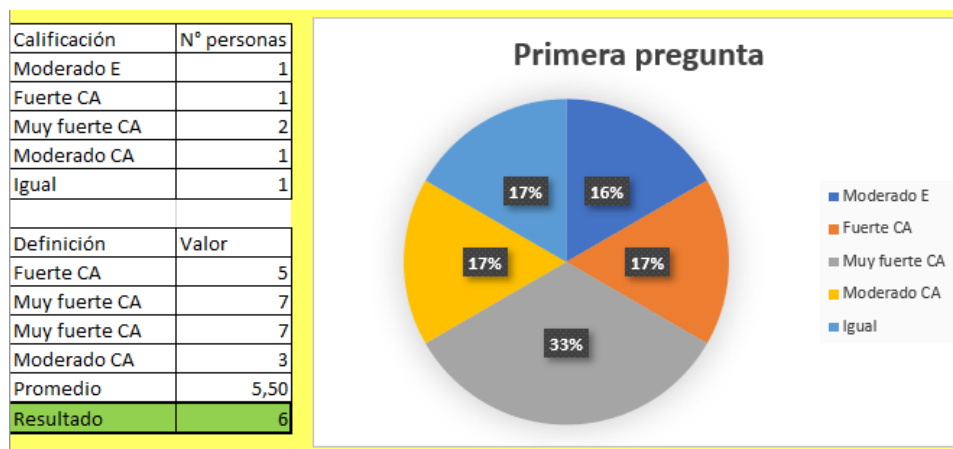
Nota: Formato de las preguntas en la plataforma de formularios de Google.

4.4. Tabulación de los resultados de las encuestas.

Para tabular los resultados de las encuestas se tomó cada una de las respuestas dadas por los profesionales para hacer un análisis cualitativo en cual se evaluó que criterio era predominante dentro del par que se estaba comparando, como se muestra en la figura 22.

Figura 22

Tabulación de resultados primera pregunta



Nota: Tabulación de resultados para la primera pregunta en la que se comparan el criterio de emisiones (E) y el consumo de agua (CA).

La encuesta fue diligenciada por seis (6) personas, de las cuales cuatro (4) indicaron en la primera pregunta que el consumo de agua es más importante que el criterio de emisiones dando como resultado un acumulado del 67% de las votaciones para el consumo de agua. De este modo, se realizó una segunda tabulación en la cual solo se consideraron las calificaciones establecidas para el consumo de agua, a cada una de estas se le asigno una equivalencia cuantitativa según los valores descritos en la tabla 16. Posteriormente, se tomaron estos valores para calcular un promedio que permitiera establecer una ponderación que para este caso particular corresponde a seis (6), valor que se obtuvo aproximando el promedio de 5,50 calculado.

Tabla 16

Definición de los valores de importancia

Valor	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia fuerte
7	Importancia muy fuerte
9	Importancia extrema
2,4,6,8	Intermedios entre cada valor ya definido

Nota: Definición de los valores de importancia según la escala de calificación de Saaty.

El procedimiento descrito en el párrafo anterior se aplicó para evaluar y tabular los resultados de las quince (15) preguntas realizadas en la encuesta, la tabulación individual de las preguntas se encuentra en el anexo 7. No obstante, la tabla 17 muestra el resumen de los resultados obtenidos en las encuestas, presentando el par de criterios evaluados, el criterio predominante y la calificación cuantitativa asignada a dicho criterio.

Tabla 17
Resultados de la tabulación

No	Par de criterios evaluado	Criterio predominante	Valor
1	Consumo de agua y emisiones	Consumo de agua	6
2	Emisiones y grado de tecnificación	Igual	1
3	Parámetros técnicos y emisiones	Parámetros técnicos	5
4	Disponibilidad y emisiones	Disponibilidad	7
5	Requerimientos de implementación y emisiones	Requerimientos	4
6	Consumo de agua y grado de tecnificación	Consumo de agua	5
7	Parámetros técnicos y consumo de agua	Consumo de agua	4
8	Consumo de agua y disponibilidad	Consumo de agua	4
9	Consumo de agua y requerimientos implementación	Consumo de agua	4
10	Grado de tecnificación y parámetros técnicos	Igual	1
11	Disponibilidad y grado de tecnificación	Disponibilidad	4
12	Requerimientos implementación y grado de tecnificación	Requerimientos	3
13	Disponibilidad y parámetros técnicos	Disponibilidad	4
14	Requerimientos implementación y parámetros técnicos	Requerimientos	5
15	Disponibilidad y requerimientos de implementación	Requerimientos	3

Nota: recopilación de datos obtenidos durante la evaluación de los resultados de la tabulación de las encuestas.

Como se puede observar en la tabla 17 el subcriterio con mayor repetitividad sobre los demás es el consumo de agua, posicionándolo como el subcriterio de mayor importancia para los profesionales encuestados; este subcriterio hace parte del criterio ambiental junto a la emisión de contaminantes y generación de residuos. Con el fin de respaldar los resultados obtenidos en la

tabulación de las encuestas se tuvo en cuenta el análisis realizado en investigaciones similares en las que se utilizara el método de selección AHP para elegir una alternativa.

De este modo, se tiene que para los autores la referencia [53] es necesario considerar el criterio ambiental dentro de la jerarquización de alternativas, puesto que, estos permiten analizar el impacto que tiene cada alternativa evaluada sobre el medio ambiente y estudiar las tecnologías que ayuden a controlar, mitigar o evitar el impacto ambiental generado. Además, basados en este mismo trabajo y sus resultados se puede concluir que el criterio ambiental es altamente destacable teniendo un valor del 56% de influencia sobre la alternativa a seleccionar; cabe destacar que para obtener estos resultados los investigadores basaron su análisis en los subcriterios de emisiones y efluentes líquidos. No obstante, los autores de la referencia [46] consideran que a la hora de evaluar el criterio ambiente debe incluirse el uso o consumo de agua como un subcriterio pues con este se puede analizar la cantidad de agua que se emplea en las diferentes etapas de las alternativas que se desean comparar, esto con el fin de elegir un proceso que requiera bajas cantidades de agua; en este artículo los autores obtuvieron como resultado un peso del 54% para el criterio ambiental siendo el subcriterio de uso de agua uno de los más destable dentro de su categoría. Asimismo, según [48] a la hora de seleccionar un mecanismo de producción industrial o semi industrial se deben considerar las políticas regionales establecidas por los organismos de control en las que se establece que parámetros ambientales se deben tener en cuenta a la hora de evaluar un proyecto. Uno de los criterios a considerar es el uso sostenible y responsable de los recursos hídricos considerando que “en el escenario futuro en torno al agua se asume la protección ambiental como objetivo social traducido en acciones encaminadas al ahorro y disminución de la demanda de agua, gestionada con racionalidad.”[48]

Por otra parte, en la tabulación de los resultados se puede evidenciar que el subcriterio de requerimientos de implementación presenta una preferencia destacable pues en cuatro (4) de quince (15) pares evaluados se consideró que era más importante que el otro subcriterio evaluado. Según la investigación desarrollada en la referencia [54] el factor económico debe ser considerado siempre que se pretendan evaluar diferentes tecnologías o alternativas de para desarrollar un proceso y para esto se debe considerar un factor específico que allí se denomina como “factor de costo inicial” que tiene como objetivo analizar los requerimientos de implementación de cada

alternativa teniendo en cuenta los costos de implementación y puesta en marcha. Los autores de la referencia [54] fijaron cuatro subcriterios o aspectos específicos y determinaron que el factor de evaluación denominado “Factor de costo inicial” tiene una preferencia relativa del 20% respecto a los otros criterios evaluados permitiendo asegurar que aunque el criterio presenta un porcentaje de preferencia significativo, no es el más destacable dentro del grupo evaluado.

La disponibilidad y el costo de las materias primas e insumos es otro de los subcriterios económicos que se comparó en las encuestas, esto debido a que en muchas investigaciones este factor es fundamental a la hora de seleccionar una alternativa de producción. Según lo descrito en la referencia [53] los costos operacionales se deben considerar a la hora de evaluar alternativas de producción, puesto que, en ellos se tienen en cuenta conceptos como el costo de materias primas y mano de obra necesarios para desarrollar la tecnología que se desea implementar; con esto los investigadores realizaron una comparación por pares de subcriterios obteniendo como resultado que el subcriterio de costos operacionales es moderadamente importante sobre los otros subcriterios comparados, es decir, que según la escala de comparación de Saaty se califica con un valor de tres (3). Además, en la referencia [55] establecen que un factor determinante, a la hora de evaluar económicamente cada alternativa es el suministro de inputs o materias primas, por tal motivo los autores de este artículo lo incluyeron como un subcriterio económico que en los resultados de la matriz de selección AHP mostró un 20,22% de preferencia sobre los otros criterios evaluados.

4.5. Matriz multicriterio

Superdesicion es un software educativo de acceso libre que brinda herramientas para crear y administrar modelos AHP y ANP; para ello cuenta con una interfaz en la cual se debe ingresar una meta, criterios, subcriterios y las alternativas que se tienen para alcanzar dicha meta; cada uno de estos parámetros se integra en un grupo llamado “clúster” y se conectan entre sí para poder acceder a la interfaz de comparación que se encarga de realizar los cálculos y hacer los análisis de sensibilidad.

Para elaborar la matriz de selección multicriterio se usó el software mencionado anteriormente, siguiendo los pasos de la guía práctica para crear modelos de decisión con el software Superdesicion [56]. La información y los datos utilizados para crear el modelo AHP en el programa, se tomó de la tabla 17 que aparece en el apéndice 4.4. Adicionalmente, para especificar el nivel de importancia de las alternativas se establecieron 3 niveles relativos que permitieran compararlas frente a cada uno de los criterios evaluados, como se muestra en la tabla 18. Este análisis se realizó teniendo en cuenta la información encontrada en las diferentes fuentes bibliográficas consultadas.

Tabla 18
Niveles relativos de comparación

Parámetros/alternativas	CA	E	RI	DM	PT	GT
Biodigestor taiwanés	Alto	Baja	Alto	Alta	Medio	Medio
Biodigestor batch	Bajo	Baja	Alto	Alta	Medio	Medio
Vermicompost	Alto	Media	Medio	Media	Alta	Medio
Pilas	Medio	Alto	Medio	Alta	Alta	Medio

Nota: Las notaciones corresponden a: Consumo de agua (CA); Emisiones (E); Requerimientos de implementación (RI); Disponibilidad de materia prima (DM); parámetros técnicos (PT); Grado de tecnificación (GT).

4.5.1. Análisis para establecer los niveles relativos de comparación

A continuación, se exponen las consideraciones que se tuvieron en cuenta a la hora de fijar los niveles de comparación entre cada uno de los criterios y las alternativas que se están estudiando con el proceso de análisis jerárquico.

- Consumo de agua: es uno de los criterios de mayor importancia según los resultados de la tabulación de encuestas, realizadas a los profesionales; razón por la cual se considera fundamental para la comparación de las alternativas y la decisión final. Por tal motivo, se realizó un análisis de consumo de agua para cada alternativa con el fin de asignar los niveles relativos de comparación presentados en la tabla 18.

Uno de los parámetros técnicos que se debe controlar durante los procesos de compostaje en pilas y vermicompost es la humedad, la cual se debe mantener constante para garantizar la eficiencia de la digestión sobre el material. Sin embargo, se necesita aireación frecuente haciendo que la humedad disminuya considerablemente, afectando de este modo el rendimiento del proceso teniendo en cuenta que: “La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%; la actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis.”[57].

El proceso del compostaje lleva bastante tiempo en completar cada una de sus etapas teniendo así unos intervalos de obtención de producto final de 4 a 6 meses, de esta manera en el momento en que la humedad disminuya se debe de rociar la pila tras varios volteos hasta llegar a la humedad requerida.

De igual manera, el vermicompost depende de la humedad del lecho ya que las lombrices deben estar en un ambiente con un rango de mínimo 70% de humedad y un máximo del 90%, razón por la cual debe haber una constante aplicación de agua sobre el lecho de las lombrices o agregar de manera continua más desechos húmedos que cumplan con la condición de agua. “En general se comienza a obtener vermicompost a partir de los 90 días”[58]. A pesar de que este proceso no tiene la misma duración que el compostaje, los niveles de consumo de agua pueden variar dependiendo de la temperatura y la humedad del ambiente en el que se esté desarrollando el proceso pues se puede evaporar el agua o concentrarse como producto de los lixiviados disminuyendo así la humedad de la cama de las lombrices.

El consumo de agua de la mayoría de estos procesos consiste en la humedad requerida; el reactor batch trabaja con una humedad igual o mayor al 90%, con el fin de distribuir las enzimas de la hidrólisis de manera uniforme y permitir el movimiento de los microorganismos. Este mecanismo se caracteriza porque es alimentado una sola vez hasta completar el proceso de obtención del producto, es decir, que se adicionaría agua solo una vez en todo el proceso. Sin embargo, se debe considerar el consumo de agua relacionado con la limpieza de los reactores o contenedores donde se realice el proceso.

El reactor taiwanés requiere una alimentación conformada por cuatro partes de agua por cada parte de excreta, es decir, una relación 4 a 1 para poder iniciar el proceso de digestión anaerobia [59]. Por otra parte, cabe destacar que, para alimentar este tipo de reactor se lavan los establos a

diario con el fin arrastrar las excretas mezcladas con agua directamente hasta el pozo de alimentación; lo que puede generar gran pérdida del fluido por evaporación o por absorción del suelo circundante al área.

- Emisión de contaminantes y generación de residuos: La contaminación por parte de la mayoría de procesos viene dada por un mal procedimiento, como es el caso del compostaje y el vermicompost en los que la lixiviación y malos olores son generados debido a que la pila o la cama carece de buena oxigenación; por lo que se desarrolla una etapa anaerobia que aumenta la temperatura ocasionando los problemas anteriormente nombrados. Además, de estos contaminantes originados por malas prácticas procedimentales, existen contaminantes intrínsecos que se generan sin importar si se esté realizando de manera adecuada o no el proceso; en este caso se desencadena un fenómeno llamado volatilización de amoníaco al aire. “En el proceso de compostaje es común tener pérdidas de nitrógeno por volatilización de NH_3 cuando se exceden los requerimientos nutricionales de los microorganismos para la degradación a concentraciones superiores de 2,4%”[60]. “Las especies nitrogenadas de N-NH_4 y N-NO_3 así como los productos degradados del nitrógeno orgánico solubles en el agua, son liberadas de la matriz de compost debido al riego y a la poca capacidad de retención de agua del material.”[60].

Por otro lado, los reactores de tipo batch y taiwanés, generan siempre malos olores debido a que llevan a cabo un proceso anaerobio, aunque cabe destacar que estos olores no son liberados ya que, al ser un sistema cerrado, mantiene el olor dentro del reactor. Otro compuesto generado al interior de los biodigestores es el gas metano, producto de la última etapa de la digestión anaerobia llamada metanogénesis. “Las moléculas de metano tienen un tiempo de vida en la atmósfera mucho menor que las de dióxido de carbono, pero son más eficientes atrapando radiación solar; por lo tanto, el potencial de calentamiento global del metano es 20 veces mayor que el del dióxido de carbono en un periodo de 100 años” [61]. Sin embargo, El gas puede ser filtrado para eliminar compuestos como el CO_2 o el SO_2 y posteriormente ser usado como combustible para la cocción de alimentos, generación de energía térmica o como materia prima para producir hidrogeno.

- Parámetros técnicos: Dentro de este criterio se debe incluir el concepto de variables dependientes para empezar a hablar de los procesos aerobios como los son el compostaje y el vermicompost. Estos métodos de producción de abono tienen una dependencia total de su

rendimiento en la aeración que le sea proporcionada durante el proceso, de aquí se derivan unas dependencias, la primera es la temperatura, puesto que si no hay suficiente aire se empezara a desarrollar una fase anaerobia que elevara la temperatura, ocasionando un incremento no deseado en la humedad y un cambio de pH que impide el crecimiento de algunas comunidades bacterianas indispensable para el desarrollo del proceso.

Por otra parte, el proceso de digestión anaerobia es más independiente en cuanto a sus variables ya que las únicas codependientes son la temperatura y pH, siendo estas las que determinan la fase en la que se encuentra el proceso. De esta manera, se puede afirmar que para los sistemas de digestión anaerobia las variables que se deben medir y controlar para asegurar el rendimiento son; la humedad, la temperatura y el pH, las cuales no requieren de una manipulación directa por parte del operario, como es el caso del volteo de pilas para garantizar la aireación en el proceso de compostaje.

- Grado de tecnificación del proceso y nivel de educación del trabajador: Respecto a lo afirmado con anterioridad para este criterio y su peso sobre las alternativas se revisó la cantidad de variables (pH, temperatura, humedad) su facilidad de control, medición y acción correctiva en caso de ser necesario, de esta manera se determinó que para ambos procesos digestivos se establece un número similar de parámetros a medir, que a pesar de ser transformaciones diferentes en donde se aplican condiciones y espacios distintos, se puede establecer la misma complejidad para cada alternativa, esto presentado en la escala de Satty como un valor de uno (1), es decir, que el grado de tecnificación se considera igualmente importante en todas las alternativas evaluadas.
- Disponibilidad y costo de materias primas: este es un criterio enfocado a evaluar la facilidad de adquisición, transporte y costo de las materias primas necesarias para desarrollar cada uno de los métodos que se están comparando. Dentro de las alternativas evaluadas, el vermicompost presenta la mayor variación de disponibilidad, esto debido a que las lombrices usadas en el proceso no se consiguen en la zona donde se encuentra ubicada la finca, por tal motivo se hace necesario buscar proveedores en otras ciudades y asumir un costo adicional por el transporte intermunicipal de las mismas. Las materias primas requeridas en los otros procesos de obtención de abono, corresponden a los materiales empleados para alcanzar los valores óptimos de relación carbono y nitrógeno según el tipo de digestión a desarrollar. Como se describió anteriormente hay unos

rangos específicos de relación carbono nitrógeno para desarrollar cada uno de los procesos, sea este anaerobio o aerobio. Cabe destacar que para aplicar cualquiera de las alternativas es necesario utilizar reguladores de la relación carbono nitrógeno como la melaza, el aserrín, los desechos hortofrutícolas o la cascarilla de arroz, según la alternativa selecciona, esto debido a que las excretas tienen un valor de relación carbono nitrógeno bajo. Sin embargo, estos productos cuentan con una disponibilidad constante con más de un proveedor o dispensador en las zonas aledañas a la finca. Teniendo en cuenta esto, se determinó que el vermicompost cuenta con un nivel relativo de comparación medio respecto a la disponibilidad y costo de las materias primas, esto debido a que en la zona donde se desarrolla la investigación no hay proveedores de lombriz californiana, haciendo que se deban adquirir en otra ciudad e incrementen los costos de transporte de las mismas.

- **Requerimientos para la implementación:** Los sistemas digestivos aerobios traen consigo un tiempo de retención extenso lo que conlleva una problemática en cuanto al control diario de excretas generadas, demandando un área de trabajo extensa en la cual se pueda acumular material, paralelamente se presentaría una problemática en cuanto al control de variables de la pila por aumento de tamaño. Además del área se debe tener un presupuesto para la infraestructura, ya que se quiere eliminar el escurrimiento de lixiviados en la tierra, por lo que se haría necesario la construcción de una superficie en concreto junto a una estructura que aislé las pilas o camas de compost de lluvias o el sol directo, con esto evitando un secado rápido por el desarrollo de una cubierta sólida que da a un inicio interno anaerobio o también el aumento de humedad creando la misma situación de anaerobiosis. En la digestión anaerobia se requiere de igual manera de un área disponible para la instalación de los tanques y la compra de los mismos, por un lado, del reactor taiwanés, se necesita una zanja no tan profunda que este recubierta en concreto o en un plástico con el fin de evitar un daño en la membrana, se requiere desarrollar un colector o un medio por el cual se pueda acumular o llevar las excretas hasta el tanque, además, para el sistema taiwanés se requiere de un sistema para poder recolectar el gas que se está produciendo durante el proceso fermentativo. El proceso batch en primera parte requiere de un número determinado de tanques a usar con el fin de mantener la cantidad de excretas generadas a diario, adicionalmente a esto se necesita un espacio cimentado para mantener estos depósitos anaerobios alejados del suelo y con el ideal de tener un espacio nivelado para el operario. En cuanto para instrumentación se debe de

hacer la misma inversión sin importar la tecnología ya que a todos los procesos se les debe de medir la temperatura, el pH y su humedad.

4.5.2. *Elaboración de matrices multicriterio*

Con los valores cualitativos y cuantitativos establecidos se montaron siete matrices de decisión en el software Superdesicion. Para la primera se establecieron quince (15) parejas de criterios en las cuales se relacionan los seis criterios entre sí, con el fin de establecer cuál de estos tiene mayor importancia. Para esto, se tomaron los resultados de la tabulación de las encuestas realizadas a los profesionales (tabla 17), colocando los valores obtenidos en la matriz desarrollada por el software. Sin embargo, fue necesario calcular la desviación estándar de los datos para conocer el grado de dispersión entre las respuestas; esto se hizo teniendo en cuenta que el programa calcula un valor de inconsistencia al diligenciar las matrices, el cual indica que tan lógicos son los valores que se están ingresando en el módulo de comparación. Este valor debe ser inferior a 0.1 para que los cálculos reportados sean confiables.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se identificaron los criterios que tenían un impacto considerable sobre el valor de la inconsistencia, para modificarlos se tuvo en cuenta la desviación estándar calculada, para de esta forma desplazar los valores de la matriz dentro de lo permitido por la desviación todo respecto a los parámetros especificados en la tabla 19.

Tabla 19
Ajuste de las ponderaciones según la desviación

Criterio predominante	Desviación	Valor tabulado	Valor utilizado
Consumo de agua	1,9	6	7
Parámetros técnicos	1	5	4
Requerimientos de implementación	2,3	4	5
Consumo de agua	2,2	5	6
Consumo de agua	1,2	4	3
Requerimientos de implementación	2,2	5	4

Nota: el valor de las desviaciones se calculó tomado como referencia los valores tabulados en Excel.

Luego de modificar los datos tomando como referencia los valores de la desviación calculados en la tabulación de los resultados de las encuestas, se obtuvo un valor de inconsistencia de 0.08822 en la matriz de comparación de criterios; cabe aclarar que el procedimiento de ajuste de inconsistencia solo se aplicó para esta matriz. Posteriormente, se realizó la evaluación de las alternativas respecto a los criterios, para esto se diligenciaron seis matrices en las que se compararon las alternativas entre si teniendo como referencia cada criterio; para esto se tuvo en cuenta la información bibliográfica y el análisis realizado para establecer los niveles relativos de comparación descrito en el apéndice anterior.

4.5.3. Interpretación de los resultados

La información mostrada en la figura 23 corresponde a la forma final de la construcción de la matriz de comparación entre pares de criterios, luego de haber tomado como referencia las calificaciones de los profesionales. La manera de interpretar esta figura es a través de los colores de cada marcador donde por ejemplo si nos ubicamos en la primera columna con primera fila obtendremos la intersección entre el consumo de agua y la disponibilidad de materias primas, viéndose reflejado al lado del nivel de importancia una flecha del color azul que en este caso corresponde al criterio de consumo de agua, lo que se puede interpretar de la siguiente manera; el criterio de consumo de agua es moderadamente importante sobre el criterio de disponibilidad de materias primas según lo establecido en la escala fundamental de Saaty. Los resultados obtenidos en las matrices de comparación entre alternativas se pueden evidenciar en el anexo 8.

Figura 23
Comparación de criterios

Inconsistencia	Disponibil~	Emisión de~	Grado de ~	Parámetros~	Requerimie~
Consumo de~	← 3	← 7	← 6	← 4	← 4
Disponibil~		← 7	← 4	← 4	↑ 3
Emisión de~			← 1	↑ 4	↑ 5
Grado de ~				← 1	↑ 3
Parámetros~					↑ 4

Nota: Gráfica sacada de la interfaz de Superdesicion que recopila los resultados alcanzados tras la elaboración de la matriz de comparación entre los pares de criterios tomando como base la tabulación de encuestas.

Una de las ventajas de usar el software Superdesicion es la facilidad a la hora de recopilar e interpretar los datos calculados por el aplicativo, puesto que se pueden encontrar diferentes módulos en los que se presenta de forma ordenada y grafica los resultados obtenidos. En la figura 24 se muestra de una forma clara el resultado obtenido luego de diligenciar la matriz de comparación entre pares de criterios; aquí se puede identificar que el consumo de agua por ponderado resultado ser más importante sobre los otros criterios, seguido de los requerimientos para la implementación y la disponibilidad de las materias primas. Este grafico se presenta de manera individual para cada una de las matrices elaborada.

Figura 24
Nivel de importancia de los criterios

Inconsistencia 0.08822		
Consumo d~		0.42315
Disponibi~		0.17889
Emisión d~		0.03705
Grado de ~		0.05472
Parámetro~		0.07412
Requerimi~		0.23207

Nota: Grafica extraída de la interfaz de Superdesicion donde se mide de manera más concreta el nivel de importancia de los criterios.

Al finalizar el diligenciamiento de las matrices, se revisaron los valores obtenidos, verificando que las inconsistencias tuvieran un valor inferior al 0.1, esto con el fin de poder acceder a la interfaz de cálculos en la que el software recopila todos los datos e internamente ejecuta un análisis de sensibilidad para elegir la alternativa que se ajusta mejor al cumplimiento de la meta según los criterios evaluados. En la figura 25 se pueden evidenciar los resultados obtenidos por la interfaz de cálculos de Superdesicion, donde se puede observar que el proceso anaerobio de biodigestión Batch presenta un 38.347% de preferencia sobre los demás métodos de producción de abono.

Figura 25
Resultados de la matriz de selección

Nombre	Grafica	Ideal	Normal
Biodigestor batch		1.000000	0.383471
Biodigestor taiwanes		0.456287	0.174973
Pilas pequeñas		0.698124	0.267710
Vermicompostaje		0.453347	0.173845

Nota: Resultados de la evaluación de los criterios sobre las alternativas, extraída de la interfaz del software Superdesicion.

5.ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Una vez seleccionado el método de producción de abono se realizó la especificación de los requerimientos técnicos del proceso, para ello se realizaron tres actividades principales la primera consistió en realizar la estimación de la cantidad de excretas generadas en la finca, posteriormente se identificaron las entradas y salidas del proceso de digestión batch; Luego se realizó un balance de masa que permitiera dimensionar un sistema de producción de biodigestión tipo batch. Finalmente, se determinaron los parámetros técnicos de operación que se deben medir y controlar durante el proceso para obtener rendimientos satisfactorios.

5.1. Estimación de la cantidad de excretas generadas

La estimación de la cantidad de excretas se realizó teniendo en cuenta el procedimiento sugerido en la referencia [62]. Este está conformado por tres pasos, el primero consiste establecer la producción vacuna, es decir, identificar el tipo de ganado y la cantidad de cabezas manejadas. El siguiente paso se denomina reconocimiento del sistema de alimentación del ganado, esto se hace con el fin de calcular el tiempo que los animales pasan al interior de los establos debido a que el excremento generado allí es el que se considera como aprovechable. Finalmente, se evalúa la producción de estiércol por cabeza y por día teniendo en cuenta que esta, “depende del tamaño y de la edad del animal, así como de la cantidad y de la composición del alimento proporcionado.”[62].

Dentro del análisis de producción vacuna se logró establecer que actualmente se manejan 16 cabezas de ganado bovino de tipo criollo con dos años de vida, clasificándolo como ganado vacuno joven en crecimiento o novillo para producción de cárnicos. Teniendo en cuenta que “un novillo de 450 kg produce en promedio 38 L o 27 kg de excrementos húmedos (orina y heces) por día, con una variación del 25% dependiendo del clima, el consumo de agua y el tipo de dieta.”[63]

En cuanto a la dieta se identificó un sistema de alimentación de pastoreo y establo, que es manejado de la siguiente manera; en un horario de 8:00 am a 5:00 pm (nueve horas) las vacas

permanecen al interior de los establos y son alimentadas con una mezcla de pollinaza sanitizada, agua, melaza, pasto de corte y urea; posteriormente son llevadas a los potreros o mangones donde permanecen las quince (15) horas restantes, allí se alimentan los forrajes o pastos de ceba.

Para la evaluación de la cantidad de estiércol se seleccionaron aleatoriamente seis cabezas de ganado, cuatro (4) machos y dos (2) hembras los cuales se colocaron en corrales individuales durante un periodo de nueve (9) horas. Una vez retiradas las vacas, se determinó la masa del excremento generado en los seis corrales, para esto se utilizaron dos palas, una caneca plástica y una báscula XTEEL W II como la que aparece en la figura 26.

Figura 26
Báscula XTEEL W II



Nota: Imagen tomada de: Milligram, Basculas y plataformas

En la tabla 20 se pueden evidenciar los resultados obtenidos en cada una de las mediciones, en esta se detalla el sexo del animal y la cantidad de excretas generadas en el periodo evaluado, esto se realizó con el fin de estimar el promedio de la cantidad de estiércol que produce una cabeza de ganado en un tiempo de nueve horas.

Tabla 20
Resultados de las mediciones

Sexo	Valor	Unidades
Macho	11,375	kg/9h
Hembra	9,925	kg/9h
Macho	11,835	kg/9h
Hembra	10,325	kg/9h
Macho	11,075	kg/9h
Macho	11,125	kg/9h

Nota: La columna llamada “valor” muestra los valores de la cantidad de excretas que generó cada cabeza de ganado en el periodo de tiempo establecido.

Con los valores reportados en la tabla 20 se calculó el promedio de excretas generadas por cabeza de ganado en nueve horas obteniendo un valor de 10,943 kg/cabeza/9h, es decir, que una vaca puede llegar a producir 1,22 kg de estiércol en una hora. Tomado este dato se calculó la cantidad de excretas generadas por las dieciséis cabezas de ganado arrojando un valor de 175, 09 kg/9h.

5.2. Identificación de las entradas y salidas

El proceso de digestión anaerobia batch se caracteriza por realizarse en lotes, esto quiere decir que las materias primas son cargadas a la unidad en la que se van a procesar y el producto sale después de cumplir un tiempo de retención específico.

Como explicó anteriormente las excretas no cuentan con la relación carbono nitrógeno adecuada para desarrollar el proceso de digestión anaerobia, razón por la cual es necesario ajustar la relación de nutrientes con reguladores propuestos en el apéndice 2.4. De este modo, se propone el uso de cascarilla de arroz, melaza y de lactosuero como conjunto regulador, con la intención de llevar la relación carbono nitrógeno hasta un valor que se encuentre dentro del intervalo establecido para iniciar el proceso de biodigestión (20:1 a 30:1). Además, se consideró que son materias primas de fácil adquisición y que su uso en grupo permite la reducción de costos.

Según lo reportado en la tabla 21 las entradas del proceso serían el conjunto de materiales reguladores con las excretas bovinas y agua, las salidas son cantidades determinadas de un biol,

una masa de biosol u abono orgánico y unas volatilizaciones que salen del sistema en forma de gases.

Tabla 21
Entradas y salidas del sistema

Entradas	Salida
Excremento de vacuno	Abono orgánico solido (Biosol)
Melaza	
Cascarilla de arroz	Abono orgánico liquido (Biol)
Lactosuero	
Agua	

Nota: Entradas y salidas del planteamiento para producción de abono a partir de excretas bovinas.

5.3. Dimensionamiento de sistema de producción

5.3.1. Estimación de las cantidades de materia prima

Para el dimensionamiento del sistema de producción se estimó la cantidad de excretas generadas durante un mes, obteniendo un valor de 5252,8 kg; adicionalmente, se estableció un tiempo de fermentación de veinte (20) días teniendo en cuenta lo descrito en la referencia [64]; Además, se estimo la cantidad de melaza, cascarilla de arroz y lactosuero que se debe utilizar para iniciar el proceso de diestión anaerobia con una relación carbono nitrogeno que se encuentre entre el rango sugerido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA) (20:1 a 30:1). Cabe destacar que “la C:N que se recomienda es de 25:1 a 30:1”[65]; esto con el fin de garantizar la disponibilidad de fuentes de carbono, nitrogeno y energía que permiten el desarrollo de los microorganismos presentes en cada una de las fases del proceso digestivo.

Para determinar la cantidad de reguladores que se deben utilizar se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- La cantidad de estiércol utilizada debe ser mayor a las cantidades de los reguladores adicionados.

- Para establecer las cantidades de los reguladores se debe considerar el costo individual de cada uno de estos y el valor de la relación carbono nitrógeno, esto con el fin de disminuir los costos asociados a insumos y materias primas.

En la tabla 22 se pueden observar los precios de venta que ofrecen los proveedores locales (Guaduas, Cundinamarca) para cada uno de los reguladores de la relación carbono nitrógeno. En la primera fila se encuentra la melaza de caña que se comercializa en bultos de 30 kg con un valor unitario de 28.000 pesos colombianos con una relación C:N de 68,84. Por otra parte, el lactosuero es distribuido por la quesera los virreyes donde la cantidad mínima vendida es de 15 L con un costo de 3.000 pesos colombianos; sin embargo, la tabla 22 reporta una cantidad en kg determinados a partir de la densidad promedio (1,026 g/cm³) encontrada en la referencia [66]. Finalmente, la cascarilla de arroz se comercializa en dos presentaciones bultos de 10 kg y pacas de 50 kg, en este caso se realizó la cotización para las pacas, teniendo en cuenta que ocupan menos espacio debido a que el material se encuentra comprimido.

Tabla 22
Costos de reguladores C: N

Regulador	Precio (COP)	Relación C: N
Melaza	28.000/30kg	68,84
Lactosuero	3.000/15,39kg	24
Cascarilla de arroz	21.000/50kg	66

Nota: Valores por carga en kg de cada uno de los reguladores a emplear.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se determinó que los reguladores que aumentan significativamente la relación C: N son la melaza y la cascarilla de arroz; Adicionalmente, se estableció que debido a su costo la melaza se debe usar en menor proporción respecto a la cascarilla de arroz. Para fijar las cantidades de reguladores de la relación C:N se realizó un tanteo tomando como base de cálculo 40 kg de estiércol que se desean llevar hasta una relación entre 25:1 a 30:1, partiendo desde un valor de 17:1 según lo reportado los resultados de los análisis de laboratorio. El tanteo se realizó tomando como referencia la ecuación 2, dejando fija la cantidad

de excretas y el valor de la relación C: N de todas las materias primas mientras se variaba la cantidad en kg de los reguladores.

En la ecuación 3 se reportan las cantidades de melaza, cascarilla de arroz y lactosuero necesarias para obtener una relación carbono nitrógeno inicial de 26,80:1 para una mezcla con 40 kg de estiércol.

Ecuación 3.

Relación C: N

$$\text{Relación C/N} = \frac{(17 \times 40 \text{ kg}) + (68,84 \times 4 \text{ kg}) + (24 \times 4 \text{ kg}) + (66 \times 6 \text{ kg})}{53 \text{ kg}} = 26,80$$

De este modo se establece que por cada 40 kg de excretas bovinas se necesitan 4 kg de melaza, 4 kg de lactosuero y 6 kg de cascarilla de arroz para obtener la relación C: N deseada. Cabe aclarar que la mezcla requiere de una fase líquida que corresponda a una relación 1:1 de líquido-estiércol, para ello se deben adicionar 36 kg de agua, la cual no se considera en los cálculos de la relación carbono nitrógeno debido a que no posee compuestos de dicha naturaleza. Se adicionan solo 36 kg debido a que el lactosuero se considera como un componente de la fase líquida.

Para estimar la cantidad de biol y biosol se tomó como base la referencia [67] en la cual se realiza un balance de masa por lotes para determinar la cantidad de biol y biosol que se obtiene al final del proceso; en este se establece que el 64,4% del producto obtenido corresponde de a biol, el 35,3% corresponde a biosol mientras el 0,3% es la cantidad de biogás generado durante el proceso. En la tabla 23 se muestra el balance de masa realizado para la base de cálculo de 40 kg de excretas, para el cálculo de las salidas se tomaron los porcentajes descritos anteriormente. Cabe aclarar que la cantidad de biogás producida no se reporta en el balance masa debido a que no es de interés para esta investigación y no se encuentra identificado como una salida del proceso.

Tabla 23

Balance de materia para la base de cálculo

Entradas	
Excretas bovinas	40 kg
Melaza	4 kg
Cascarilla de arroz	6 kg
Lactosuero	4 kg
Agua	36 kg
Total, entradas	90 kg
Salidas	
Biol	57,96 kg
Biosol	31,77 kg
Total, salidas	89,73 kg

Nota: El total de salidas no es igual al total de entradas debido a que no se considera la producción de biogás.

5.3.2. Sistema de producción establecido

El sistema de producción se diseñó teniendo en cuenta que una vaca genera en promedio 10,943 kg de excretas durante un periodo de 9 horas, es decir, que dieciséis (16) cabezas de ganado generan 175,09 kg/9h; cabe destacar que a la hora de ejecutar los cálculos las nueve (9) horas se consideraron como un día de producción. De este modo, se calculó la cantidad de excremento que se produce al interior de los establos durante un periodo de treinta días (un mes) obteniendo un resultado de 5252,80 kg. Asimismo, se consideró que se tendrá un tiempo de retención de veinte (20) días para completar el proceso de biodigestión anaerobia. Por otra parte, se debe considerar que las excretas no deben permanecer durante largos periodos expuestos a factores ambientales como el sol, la lluvia, hongos y otros contaminantes que afecten las características fisicoquímicas de el estiércol.

De este modo, se propone un mecanismo de producción compuesto por seis (6) tanques de 2000 L, los cuales iniciaran el proceso productivo con una diferencia de cuatro (4) días entre tanque y tanque. Para esto, se realizará la recolección diaria de las excretas las cuales se depositarán en el tanque que este programado para iniciar proceso, hasta completar la cantidad equivalente a cuatro (4) días de generación de excretas (700,37 kg). Una vez culminada la recolección del estiércol se deben alimentar la melaza diluida en agua, el lactosuero y cascarilla de arroz, teniendo en cuenta las relaciones establecidas en la base de cálculo del apéndice 5.3.1.

En el anexo 9 se muestra el diagrama de tipo plot plant en el que se puede apreciar la distribución de las zonas que se proponen para el desarrollo del proyecto. Este se encuentra conformado por dos (2) áreas; la primera corresponde al área de producción para la cual se tiene un área de 32,26 m² en los cuales se encuentra una plataforma de 29,24 m² con 70 cm de altura sobre la cual se ubicaran los seis tanques de 2000 L que actuaran como biodigestores, estos se encuentran organizados en dos (2) hileras de tres (3) tanques, con un espacio de 2 m entre hileras, cada uno de estos tanques cuenta con una zona de delimitación de 50 cm desde la línea de demarcación hasta la pared del tanque; asimismo se estableció que la distancia entre tanques medida desde las líneas de demarcación es igual a 1 m. Por otra parte, los rectángulos que se observan a los costados de la zona de producción corresponden a dos albercas en las cuales se descargara el contenido de los tanques, estas tienen una altura de 40 cm, una longitud de 5,4 m y un ancho de 0,56 m. Estas contarán con una malla filtro que funciona por gravedad y permite la separación del biol y el biosol.

La segunda corresponde a un área multipropósito, para la que se destinó una superficie total de 21,17m². Esta se encuentra dividida en cuatro zonas; la primera corresponde al almacenamiento de materias primas, con el espacio suficiente para acumular los insumos requeridos durante un mes de operación. Para dimensionar este espacio se tuvo en cuenta que en un mes el proceso demanda un total de dieciséis (16) pacas de cascarilla de arroz con las siguientes dimensiones, 80 cm de largo, 50 cm de ancho y 50 cm de espesor; estas se organizarán sobre nueve (9) estibas de 60 cm por 60 cm. Del mismo modo, se fijó la cantidad de espacio que ocuparían dieciocho (18) bultos de melaza con un largo de 60 cm y un ancho de 35 cm, los cuales se distribuirán sobre cuatro (4) estibas de 60 cm por 60 cm. La distancia entre las pilas de cascarilla de arroz y de melaza será de 1 m para garantizar el acceso del operario a la zona. La segunda zona corresponde a un área de mezcla en la cual se colocará un tanque de 1000 L aforado, en que se deberá realizar la mezcla del agua, la melaza y el lactosuero que ingresará a los digestores; contigua a esta se encuentra la zona de pesaje en la que se encontrará la báscula y las canecas para realizar el pesaje de los materiales. Finalmente, en el costado inferior izquierdo se encuentra la zona de utilería destinada para almacenar las herramientas como palas, carretilla, mezcladores y elementos de limpieza.

5.4. Determinación de parámetros técnicos de operación

Como se señaló anteriormente, la digestión anaerobia consiste en cuatro etapas en las que distintos microorganismos actúan degradando el material orgánico para transformarlo en abono líquido y sólido; haciendo necesario que las variables de control se establezcan teniendo en cuenta las condiciones óptimas para el desarrollo de los microbios presentes en cada una de las etapas. Para determinar los parámetros técnicos de operación se tuvieron en cuenta las características de desarrollo descritas en la tabla llamada “microorganismos de la biodigestión” mostrada en el anexo 10.

- **Temperatura:** se establece un intervalo ideal de proceso desde los 35 °C a 70 °C, en donde el límite inferior corresponde a la temperatura de la etapa de hidrólisis mientras el límite superior sería la temperatura normal presentada en la fase de metanogénesis. Para la medición de la temperatura se propone utilizar termómetros digitales de sonda con medición continua instalados en cada uno de los tanques de biodigestión.
- **pH:** La actividad microbiológica se ve afectada por este factor, razón por la cual se establece como un parámetro técnico de control. Tomando como base la referencia [25] se fija un intervalo de trabajo óptimo entre 5 y 8,4 en pH, definiéndose que no se está comprobado una inhibición fuera del intervalo. El proceso debe iniciar con un pH cercano a la neutralidad (6 a 7), este pH debe permanecer estable durante la fase de hidrólisis, una vez inicie la acidogénesis se debe presentar un descenso de pH el cual no debe ser inferior al valor de 5, debido que no iniciará la fase de acetogénesis en la cual se experimentará un ascenso del pH que no debe superar el valor de 8,4. Para controlar este parámetro se propone realizar mediciones cada cuatro días, para la cual se deberá accionar una válvula lateral del tanque, permitiendo la salida de líquido al que se le tomara una lectura con ayuda de un medidor digital de pH con compensación automática de la temperatura (ATC) o también es posible por medio de papel tornasol basados en una disminución de costos inicial pero no a largo plazo, ya que el equipo se podrá usar de manera ilimitada y el papel se verá limitado a la cantidad de tirillas disponibles y de unas continuas compras.
- **Carga inicial de C: N:** Según lo nombrado en los apéndices anteriores, este es uno de los parámetros más importantes dentro de los primeros pasos para iniciar el proceso, aquí se debe garantizar una correcta carga de nutrientes para mantener un metabolismo activo durante la

digestión. El ajuste de este se hace según lo nombrado con anterioridad, teniendo en consideración la cantidad y relación carbono y nitrógeno de cada una de las materias que entran al sistema.

- **Humedad:** La medición de la humedad se debe realizar en dos ocasiones; la primera una vez se tenga extendido el biosol sobre las mayas de filtración; la segunda medición se debe realizar después de cumplir el periodo de secado; esto con el fin de tener trazabilidad de las mermas de contenido líquido que se tienen durante el proceso. Además, con el control de este parámetro se garantiza la calidad de producto de terminado exigida por la NTC 5167 en donde se establece una humedad máxima del 20% para abonos orgánicos sólidos. Para controlar este factor se sugiere el uso de un higrómetro digital de tipo sonda con un rango de medición de 10% a 98% de humedad.

6. DETERMINACIÓN DEL COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo tiene como fin determinar los costos de implementación del sistema, teniendo en cuenta adecuaciones del terreno, materiales de construcción, mano de obra, equipos de proceso, instrumentos para la medición de las variables a controlar y materias primas necesarias para la producción durante un mes de operación.

Para establecer los costos referentes a las adecuaciones de terreno y los materiales de construcción, se tuvo en cuenta que se propone construir un espacio de 56 m² ubicado en un terreno pendiente cercano a los corrales donde se recolectan las excretas; la estructura se construirá en niveles con el fin de aprovechar la topografía del terreno; sin embargo, se hace necesaria la realización de una nivelación o explanación. Adicionalmente se tuvo en cuenta que la totalidad de la estructura debe ser techada, la zona de almacenamiento deberá contar con muros mientras la zona de producción solo contará con seis columnas sin muros.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito y los cálculos de las áreas se realizó una estimación de los materiales que se requieren para la construcción de la estructura; una vez establecidas las cantidades se solicitaron varias cotizaciones para comparar precios y elegir el más conveniente. En la tabla 25 se muestran los materiales, las cantidades necesarias, el valor unitario, el valor y el total reflejado en la cotización.

Por otra parte, el costo de la mano de obra se calcula por metro cuadrado terminado, para conocer este valor se contactó un maestro de construcción quien fijó un valor de \$ 250.000 pesos por metro cuadrado terminado, indicando que este valor incluye los costos de transporte teniendo en cuenta que la estructura será construida en una zona rural; de esta manera se calculó un valor total de \$ 14.000.000 de pesos por 56 m² terminados.

Tabla 25
Costos de los materiales para la construcción de la estructura

Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor	Cotización
Cemento (bultos)	133	\$ 25.000	\$3.325.000	Construrama
Mixto (m ³)	11	\$ 85.000	\$935.000	IMG
Arena gris (m ³)	2	\$ 85.000	\$170.000	IMG
Piedra (m ³)	24	\$ 80.000	\$1.920.000	IMG
Mayas electrosoldadas 4 mm	5	\$144.000	\$720.000	Construrama
Varillas 1/2	107	\$29.500	\$3.156.500	Construrama
Varillas 3/8 (kg)	405	\$4.800	\$1.944.000	Construrama
Alambre negro recocido (kg)	60	\$6.800	\$408.000	Construrama
Bloques N°5	1100	\$1.500	\$1.650.000	IMG
Cubierta arquitectónica (m ²)	70	\$122.000	\$1.464.000	Construrama
Materiales eléctricos	Varios	N. A	\$1.000.000	Maestro de construcción
Total			\$ 16.692.500	

Nota: Las siglas N.A indican que este parámetro no aplica y los valores reportados en esta tabla se tomaron de las cotizaciones mostradas en el anexo 11.

Los costos relacionados con la adquisición de equipos y preparación de los mismos para su operación y obtención de producto terminado, se realizó la cotización de seis (6) tanques de 2000 L que operaran como digestores; un (1) tanque de 1000 L que cumple la función de mezclador; un (1) mezclador EINHEL TC-MX 1400; un (1) rollo de malla de 1000 micras para elaborar los filtros separadores de biol y biosol; accesorios para drenaje y escape de tanques. En la tabla 26 se puede encontrar el valor unitario de cada uno de los equipos, el valor, la referencia de los lugares donde se realizó la cotización y el valor total que representa la adquisición de los mismos.

Tabla 26
Cotización de equipos y accesorios de acondicionamiento

Equipos	Cantidad	Valor unitario	Valor	Cotización
Tanque de 2000 L	6	\$ 728.000	\$4.368.000	Revisar referencia[68]
Tanque de 1000 L	1	\$ 332.900	\$ 332.900	Ver referencia [69].
Mezclador EINHEL TC-MX 1400	1	\$465.000	\$465.000	Consultar referencia [70].
Rollo de malla verde de 1000 micras	1	\$96.000	\$96.000	Perez Agroplasti
Tubo Sanitario 3" x 2 m	1	\$27.880	\$27.880	Construrama
Adaptador hembra 3"	6	\$30.000	\$180.000	IMG
Adaptador macho 3"	6	\$24.000	\$144.000	IMG
Adaptador hembra 3/4" presión	6	\$700	\$4.200	Construrama
Adaptador macho 3/4" presión	6	\$ 600	\$ 3.600	Construrama
Válvula Bola PVC 3/4" Roscada	6	\$ 8.200	\$49.200	Construrama
Válvulas o registros de paso de bola 1"	6	\$16.500	\$ 99.000	IMG
Tubería de 1" de presión	4	\$ 31.800	\$ 127.200	Construrama
Electrobomba de 1 HP	1	\$222.000	\$222.000	Construrama
Accesorios Hidráulicos	Varios	N. A	\$600.000	Maestro de Construcción
Total			\$ 6.718.980	

Nota: Las cotizaciones correspondientes a Perez agroplasti, Construrama e IMG se pueden apreciar en el anexo 11. Las siglas N.A indican que este parámetro no aplica.

En la tabla 27 se muestran los instrumentos para la medición de la temperatura, pH y la humedad sugeridos para controlar el proceso. Adicionalmente, se proponen unos elementos de utilería para la manipulación de las materias primas, entre estos se encuentra una (1) escalera móvil de cuatro pasos con plataforma para que el operario pueda tener acceso fácil y seguro a la zona de alimentación de los digestores; un (1) elevador móvil que se usara para transportar las materias primas desde la zona de pesaje hacia la zona de producción en donde se utilizará como elevado; una (1) carretilla para cargar las excretas recolectadas en los establos; dos (2) palas y trece (13) estibas para organizar las materias primas.

Tabla 27*Instrumentos de medición y elementos para manipulación de materias primas*

Equipos	Cantidad	Valor unitario	Valor	Cotización
Escalera de 4 pasos con plataforma	1	\$ 899.900	\$899.900	Ver referencia [71].
Elevador móvil	1	\$ 1.700.000	\$ 1.700.000	Ver referencia [72]
Carretilla	1	\$140.000	\$140.000	Perez Agroplasti
Pala	2	\$21.500	\$43.000	Perez Agroplasti
Canecas	2	\$24.700	\$49.400	Ver referencia [73]
Termómetro digital con sonda	6	\$13.900	\$83.400	Ver referencia [74]
Higrómetro digital con sonda	1	\$59.900	\$59.900	Ver referencia [75]
Medidor digital de pH	1	\$36.000	\$36.000	Ver referencia [76]
Estibas	13	\$11.000	\$143.000	Empaque la felicidad
Total			\$ 3.154.600	

Nota: las cotizaciones correspondientes a Perez agroplasti y empaque la felicidad se pueden apreciar en el anexo 11.

Teniendo en cuenta los valores reportados en las cotizaciones relacionadas a los costos de implementación, se tomaron los totales de las tablas 25, 26 y 27 obteniendo un valor de \$40.566.080 pesos al cual se le sumó un 3% de imprevistos correspondientes a \$1.216.982 pesos para obtener un ponderado de \$41.783.062 pesos que deben tener disponibles para la construcción de instalaciones y la adecuación de los equipos necesarios para el desarrollo del proyecto.

Por otra parte, se tuvieron en cuenta unos gastos operacionales, tales como el costo de las materias primas a usar en el proceso, material de empaque para el producto terminado y costo de la mano de obra, todo esto evaluado para un mes de producción. Esto se realizó teniendo en cuenta que para poner en marcha el proceso se requieren materias primas e insumos que se deben considerar en los costos de implementación. En la tabla 28 se pueden observar los valores unitarios y los valores totales de cada una de las materias primas, en primer lugar, se encuentra la melaza requiriendo 18 bultos de 30 kg cada uno con un valor total de \$504.000 pesos. Adicionalmente, se determinó que se requieren 512 litros lactosuero, esta cantidad se registró en litros debido a que es

la unidad de medida en la que el distribuidor comercializa el producto, en este caso se deberán cancelar \$102.400 pesos. La cascarilla de arroz se cotizo en pacas de 50 kg cada una con un valor unitario de \$21.000 y un total de \$ 336.000 pesos por 16 pacas, el número de bultos de melaza, pacas de cascarilla de arroz y litros de lactosuero se calculó teniendo en cuenta la cantidad de cada regulador requerida para acondicionar 5252,8 kg de excretas (residuos generados durante un mes de producción ganadera).

El concepto de concesión de agua corresponde al derecho de uso de aguas publicas superficiales como ríos, quebradas y arroyos; en este caso al tratarse de una región rural en la que no se cuenta con servicio de acueducto y alcantarillado se debe solicitar una concesión de aguas superficiales ante la Corporación Autónoma Regional (CAR). Durante la solicitud se debe realizar un pago por los servicios de evaluación prestados por la CAR, la tarifa de este servicio se calcula según lo establecido en la ley 633 del año 2000 en la que se expone una tabla tarifaria propuesta con la que se puede estimar el valor que se debe cancelar para recibir la visita de evaluación que aprobará la concesión, cabe destacar que las tarifas dependen del valor por el que este avaluada la implementación del proyecto, para este caso aplica el rango entre \$36.565.000 y \$51.500.000, para el cual se establece un costo de \$ 309.000 pesos. La concesión tendrá una vigencia mayor a cinco (5) años e inferior a treinta (30) años según lo establecido durante la evaluación realizada por los profesionales de la CAR.

La tabla 28 relaciona las lonas necesarias para empacar el biosol, estas se comprarán a una empresa avícola la cual vende como mínimo un total de 100 lonas usadas en perfectas condiciones para ser reutilizadas, cada bolsa tiene un costo individual de \$350 pesos. Esta cantidad de lonas alcanza para empacar lo producido por ocho (8) tanques. Adicionalmente, se consideró la compra de un bulto de cal agrícola que se almacenará y se utilizará como regulador de pH cuando sea necesario, este tiene un costo de \$13.500 pesos.

Para realizar las tareas relacionadas con la producción del fertilizante se requiere de un operario que trabaje en una jornada laboral de tiempo completo, es decir, 48 horas a la semana. Dentro de las actividades a realizar a diario esta la recolección de las excretas luego de la partida de los animales del establo; el lavado de los digestores; la preparación de los tanques con la carga necesaria de reguladores y el empacar el biosol obtenido.

Tabla 28
Gastos operacionales

Concepto	Cantidad	Valor unitario	Valor
Melaza	18 bultos	\$28.000	\$ 504.000
Lactosuero	512 L	\$200	\$ 102.400
Cascarilla de arroz	16 pacas	\$ 21.000	\$ 336.000
Concesión agua	1	\$309.000	\$309.000
Lonas	100	\$350	\$35.000
Cal agrícola	1 bulto	\$13.500	\$ 13.500
Operario	1	\$1.382.255	\$1.382.255
Total, gastos operacionales			\$2.682.155

Nota: gastos operacionales evaluados para un mes de producción

En la figura 28 se muestran los valores obtenidos con ayuda de la calculadora laboral que se encuentra en la página del ministerio del trabajo, con esta se puede conocer la liquidación que debe hacer el empleador, para esto se ingresó el valor un salario mensual correspondiente al salario mínimo legal vigente que corresponde a \$908.526 peso y auxilio de transporte considerando que el empleado se debe trasladar desde su casa hasta la finca. Tomando como base el salario se calcularon las prestaciones sociales y los aportes a la seguridad social, en este caso se aplicó la exoneración para empleadores, razón por la cual no se reportan aportes por conceptos parafiscales. De esta manera se calculó un total de \$1.382.255 que se debe pagar como remuneración por las horas de trabajo del operario contratado.

Figura 28
Cálculo de liquidación para empleador

Salario	908.526
Transporte	106.454
PRESTACIONES SOCIALES	
Cesantías	84.582
Intereses sobre cesantías	10.150
Primas	84.582
Vacaciones	37.855
APORTES A LA SEGURIDAD SOCIAL	
Pensiones (AFP)	109.023
Salud (EPS)	77.225
Riesgos Laborales (ARL)	4.743
Exoneración para empleadores de acuerdo con el artículo 65 de la Ley 1819 de 2016, para trabajadores que devenguen menos de 10 SMMLV. Salud, SENA e ICBF quedan en cero pesos para el empleador.	
Total con exoneración	1.382.255

Nota: Figura donde se tiene en cuenta las prestaciones y aportes a la seguridad del operario que realizaría las tareas de producción de biosol y biol

De este modo, se tomó el total de los gastos operacionales calculados para un mes de operación, \$1.382.255, y se sumó con el total de los costos de implementación debidos a la construcción de instalaciones y adecuación de equipos con un 3% de imprevistos, \$41.783.062, obteniendo un valor de \$43.165.317 necesarios para implementar y poner en marcha el proyecto.

7. BIODIGESTOR A ESCALA LABORATORIO

Como actividad adicional se desarrolló un ensayo a escala laboratorio del proceso de digestión anaerobia tipo batch cuyo montaje tuvo lugar en la finca Mirador de las Marías. Esta actividad se realizó con el fin de conocer la influencia de las variables macroscópicas como pH, temperatura y relación carbono nitrógeno en el rendimiento del proceso; además de conocer las propiedades físicas y químicas del nuevo producto en un tiempo de retención definido. Cabe aclarar que se llevó a cabo una sola corrida, razón por la cual no se puede concluir que los productos de digestión van a tener las mismas características que se mostraran en este capítulo.

7.1. Materiales y métodos

Para realizar el ensayo de biodigestión batch se hizo necesaria la adaptación de un tanque que actuara como biodigestor, para esto se emplearon los materiales que se enlistan a continuación:

- 1 caneca plástica de 200 L con tapa y correa de sellado.
- 3 metros de tubo PVC de 3/4" (tubería de presión).
- 4 codos PVC de 3/4".
- 4 tees PVC de 3/4".
- 1 flanche de 1/2".
- 1 válvula de PVC roscada de 1/2".
- 2 bujes Soldado PVC Sanitario 3" X 2".
- 1 unión PVC sanitaria de 3".
- 1 buje PVC de 2" X 1".
- 1 rodamiento con diámetro interior de 19 mm y diámetro exterior de 60mm.
- 2 adaptadores macho de 1/2".
- 1 adaptador hembra de 1/2".
- 1 miple de 2 cm de 1/2".
- 1 registro metálico de 1/2".
- 1 termohigrómetro digital de sonda.
- 1 botella plástica de 3 L.
- 1 metro de manguera flexible para gas.

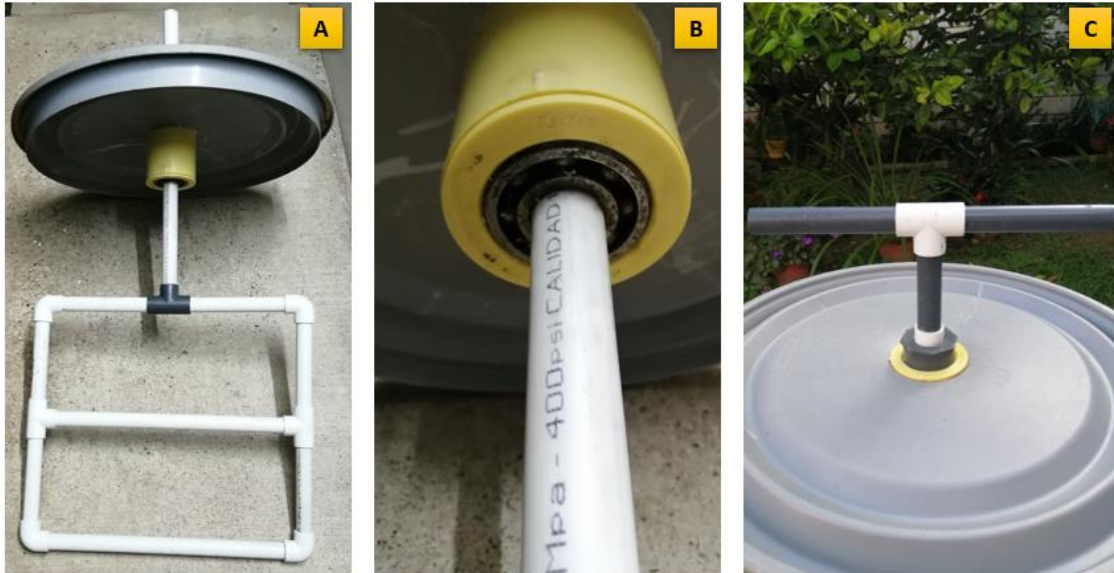
- 1 bascula XTEEL W II.
- 1 caneca de 25 L.
- 2 palas.

7.1.1. Adaptación del tanque

Para iniciar el proceso se realizó la adaptación de la caneca plástica de 200 L con el fin de convertirla en un biodigestor batch. De este modo, se hicieron dos aberturas con un diámetro de 23 mm en el costado lateral del tanque, la primera perforación se realizó en la parte inferior del tanque, allí se acoplo el flanche de 1/2" y la válvula de PVC roscada con el objeto de poder extraer muestras de la fase líquida y de esta manera tener control del pH durante el proceso. La segunda abertura se ubicó en la parte superior del tanque, en esta se ensambló el equipo para el escape del biogás para este se emplearon los dos adaptadores macho de 1/2", el miple, el adaptador hembra, el registro metálico, la manguera flexible y la botella, este equipo tiene por objeto evitar el aumento de presión al interior del tanque debido a la acumulación de gases generados durante la digestión.

Por otra parte, fue necesario construir un agitador que funcionara sin la necesidad de abrir el tanque, para esto se utilizaron los tres (3) metros de tubo PVC de 3/4", cuatro (4) codos, cuatro (4) tees, dos (2) bujes PVC Sanitario 3", una (1) unión de PVC sanitaria de 3", un (1) buje PVC de 2" y un rodamiento con diámetro interior de 19 mm y diámetro exterior de 60 mm. El tubo de tres metros se debe cortar para formar la estructura mostrada en la figura 29 A, para esto se emplearon los accesorios de tubería y soldadura; adicionalmente en la figura 29 B se puede apreciar la forma en la que se ensambló el rodamiento en uno de los bujes de tubería sanitaria, este buje va conectado a la unión de 3" que esta soldada en el agujero de la tapa del tanque; para garantizar la hermeticidad del sistema, se adaptó un segundo buje de tubería sanitaria (amarillo) en la parte superior de la tapa, ver figura 29 C, unido a este se colocó un buje de PVC de 2" (negro), al cual se le soldó la manija que desplazaría el agitador.

Figura 29
Sistema de agitación del tanque



Nota: Las fotografías fueron tomadas por los autores en el momento de adaptación del tanque.

7.1.2. Montaje del sistema de digestión

La preparación de la mezcla se realizó teniendo en cuenta las cantidades de la base de cálculo reportadas en la tabla 23 del apéndice 5.3.1. Por tal motivo, se agregaron 40 kg de estiércol, 6 kg de cascarilla de arroz, 4 kg de lactosuero y 4 kg de melaza.

En primera instancia se recolectaron los 40 kg de excretas y se cargaron al tanque de 200 L, luego en un recipiente auxiliar se disolvieron los 4 kg de melaza en 12 kg de agua, este proceso se realizó manualmente hasta obtener una solución uniforme libre de grumos, posteriormente se incorporó el lactosuero al tanque auxiliar, esta mezcla se adicionó al tanque de 200 L y se homogenizó con las excretas; luego se adicionaron 24 kg de agua manteniendo una agitación constante, dicha agitación se realizó de manera manual con un tubo de PVC sellado en el extremo que tendría contacto con la mezcla. Finalmente, se adiciono la cascarilla de arroz y se agito la mezcla hasta incorporar las materias primas.

Teniendo la mezcla preparada, se colocó el termohigrómetro de sonda pegando a las paredes del tanque para que interfiriera con el proceso de agitación del tanque, una vez instalado se colocó la tapa adecuada con el agitador, esta se aseguró con una correa metálica con el fin de asegurar la hermeticidad del tanque. Posteriormente, se instaló la manguera flexible para gas, la cual debía ir conectada al registro metálico que se encontraba en la parte superior del tanque, el otro extremo de la manguera se introdujo en una botella de 3 L garantizando que el extremo quede cubierto por agua; esta botella se aseguró y se llenó de agua hasta completar aproximadamente 2 L de agua. El sistema de la botella se implementó con el fin de atrapar los gases que se producen durante el proceso de digestión anaerobia y evidenciar el avance del mismo.

7.1.3. Seguimiento del proceso de digestión

Las variables a las que se les llevo un seguimiento durante el proceso fueron la temperatura y el pH, la temperatura se midió de forma continua con un termohigrómetro de sonda que se instaló en el tanque; mientras el pH se midió con ayuda de papel tornasol tomando muestras del líquido por medio del accionamiento de la válvula que se adecuó en la parte inferior del tanque. El proceso de supervisión se llevó a cabo cada tres (3) días después de la fecha de inicio del proceso (02/04/2021); en la tabla 29 se muestran los resultados de las mediciones realizadas y la fecha en la que se ejecutó dicho control; asimismo se puede evidenciar el aumento de temperatura y el descenso de pH entre medición y medición. Las mediciones se realizaron luego de agitar el tanque, es decir, que antes de las mediciones registradas en la tabla 29 corresponde a las lecturas efectuadas después de agitar la mezcla, esto se hizo con el fin de homogeneizar la temperatura y el pH en el digestato.

Tabla 29
Lecturas de pH y temperatura

Fecha	Temperatura (°C)	pH
02/04/2021	26,2	7
05/04/2021	53,9	6
08/04/2021	54,9	5
11/04/2021	57,9	5

Tabla 29. Continuación

14/04/2021	70,0	4
------------	------	---

Nota: Las lecturas se realizaron luego de agitar el tanque para tener una lectura acertada.

Una vez realizado el montaje se tomó la temperatura y el pH de la mezcla obteniendo un valor de 26,2 °C y 7 para el pH; con estos valores registrados en el primer día del proceso se evaluó el avance del mismo, teniendo en cuenta que los cambios de estos dos parámetros permiten identificar la etapa en la que se encuentra el proceso. La siguiente revisión se efectuó el día 5 de abril del 2021, en donde se agitó el digestato antes de realizar las mediciones donde se registró una temperatura de 53,9°C y un pH de 6; con estos datos se evidenció una transición desde la hidrólisis hacia la acidogénesis. Iniciando la segunda semana de proceso el día 8 de abril del 2021 se registró una temperatura de 54,9 °C y un pH de 5 indicando que el proceso se encontraba en la fase de acidogénesis, la cual se extendió hasta la tercera semana de proceso.

En la tercera semana se presentó un descenso de pH registrando un valor de 4, quedando por debajo del límite inferior recomendado en el proceso, razón por la cual se hizo necesaria la adición de un estabilizador de pH. Sin embargo, al abrir el tanque se observó la presencia de un hongo en la superficie del digestato como se muestra en la figura 30, donde se puede apreciar una capa de color blanco con parches de color verde oliva; razón por la cual se tomó la decisión de consultar una microbióloga industrial quien confirmó que se trataba de un hongo, pero se especificó la familia ni la especie a la que pertenecía este microorganismo, puesto que se tomaron pruebas para analizarlo y definir sus características específicas. Teniendo en cuenta esto, la microbióloga sugirió retirar el hongo presente en la superficie, adicionar carbonato de calcio (cal agrícola) hasta obtener un pH entre 6 a 7 y separar la el biol del biosol para disminuir la humedad del solido para evitar la formación del hongo.

Para retirar el hongo que se ve en la figura 30 se realizó un raspado con una espátula previamente sanitizada; de esta manera, se eliminó la parte superficial del digestato colocando este residuo al interior de una bolsa antes de sellar la bolsa se espolvoreó cal agrícola para inactivar el hongo. Posteriormente, se agregó carbonato de calcio sobre la mezcla de biol y biosol que se

encontraba en el tanque llevando el pH hasta un valor de 7. Una vez terminado el proceso de estabilización del pH se adecuó un recipiente auxiliar con una malla filtro con la que se separó el abono líquido del abono sólido; para extraer el producto de la caneca de 200 L se utilizaron canecas de 6 L cuyo contenido fue vertido en el recipiente con la maya filtro, el biosol recogido por el filtro se depositó en canastillas forradas con bolsa, esta bolsa se colocó con el fin de garantizar la continuidad del proceso anaerobio durante los ocho (8) días que faltaban para culminar el tiempo de operación; con el fin de regular la humedad se realizaron perforaciones en el fondo de la canastilla permitiendo el escurrimiento del líquido residual. Finalmente, se procedió a lavar la caneca de 200 L para depositar nuevamente el biosol o abono líquido y continuar el proceso de digestión. Cabe destacar que esta acción correctiva en la que se separaron los productos se realizó con el fin de evitar la reaparición de un hongo que afectara la calidad del producto terminado o acelerara la degradación del mismo.

Figura 30
Hongo superficial



Nota: Fotografía tomada por los autores durante la revisión

7.2. Resultados

Una vez culminado el proceso se tomaron dos muestras una de biol y otra de biosol, las cuales se enviaron a los laboratorios contratados para que fueran analizadas y de este modo conocer las propiedades fisicoquímicas de los nuevos productos.

El biosol es uno de los productos de la biodigestión batch realizada en el ensayo. Sin embargo, al realizar la acción correctiva, en la que se separó el biol del biosol; el abono sólido quedo con un

exceso de humedad registrando un valor de 59%, teniendo en cuenta esto, se debió de agregar viruta de madera con el fin de ampliar los poros de la masa facilitando la circulación de las corrientes de aire y de este modo disminuir el contenido de humedad lo más rápido posible, ya que el tiempo de secado no se iba a completar según lo establecido (tres días); esto debido a que la muestra se debía enviar al laboratorio contratado lo más pronto posible, razón por la cual el biosol solo tuvo un tiempo de secado de un (1) día. La adición de este insumo afectó de manera directa los valores que definen la relación carbono nitrógeno final del producto. La tabla 30 muestra en su contenido los resultados del biosol, el abono orgánico producido a partir del compostaje en la finca y los valores de referencia fijados en la NTC 5167.

Tabla 30
Comparación del biosol contra el abono orgánico producido actualmente

Determinación analítica	Unidad	Valor del biosol	Valores del abono orgánico producido actualmente	Valor de referencia
Fosforo (P ₂ O ₅)	%	0,30	0,85	Mayor a 1
Cenizas	%	11,7	39,09	Máximo 60
Nitrógeno (N)	%	0,67	1,10	Menor a 1
Contenido de humedad	%	47,39	22,83	Máximo 20
Perdidas por Volatilización	%	40,92	38,09	Sin restricción
Carbono Orgánico Oxidable (CO)	%	29,77	18,42	Mínimo 15
Capacidad de retención de humedad	%	256,66	236,58	Mínimo su propio peso
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	cmol(+)/kg	55,99	29,96	Mínimo 30
Densidad	g/100 cm ³	0,23	0,26	Máximo 0,6
pH	Unidades de pH	7,66	5,79	Entre 4 a 9
Conductividad Eléctrica (C.E.)	dS/m	3,39	9,46	Sin restricción
Potasio (K ₂ O)	%	0,46	1,39	Mayor 1%
Relación Carbono/Nitrógeno (C:N)	Adimensional	44,69	12,96	Sin restricción Pero según la ONUAA debe ser >=18

Nota: El biosol es el abono obtenido durante el ensayo de digestión batch.

En cuanto a los parámetros de referencia dados por la NTC 5167 hay unos que se deben garantizar mientras que otros solo se deben reportar. Dentro de los parámetros a garantizar se encuentra la humedad del sólido, en donde ninguno de los dos cumplió debido a que el tiempo de secado fue insuficiente y no se logró retirar la cantidad de agua solicitada en la norma. El contenido de cenizas tiene un valor máximo de 60% que equivale a un porcentaje cercano a la cantidad de minerales disponibles en el abono, en este caso ambos abonos cumplen con el límite al encontrarse por debajo de la especificación, sin embargo, el abono compostado registró un porcentaje de cenizas mayor. Por otra parte, la capacidad de intercambio catiónico es otro valor que se debe asegurar, puesto que, como se nombró con anterioridad representa la facilidad de disposición de minerales entre abono, suelo y planta, en este parámetro el biosol presenta un mejor rendimiento presentando un valor de 55,99 cmol (+)/kg; mientras el abono compostado presentó un valor de 29.96 cmol (+)/kg. La capacidad de retención por parte del abono debe ser superior al mismo peso de la muestra, donde para ambos se obtuvo un buen resultado siendo capaz de retener el doble del peso en agua. El pH afecta de manera directa el suelo o el cultivo, sin embargo, no hay un intervalo establecido debido a que todos los suelos tienen requerimientos diferente, por tal motivo la norma solo reportarlo; cabe resaltar, lo ideal sería que la finca Mirador de las Marías busca utilizar este biol como fertilizante en cultivos de maíz en donde se requiere un pH cercano a la neutralidad como es el caso del biosol. La densidad según la norma es algo a tener en cuenta, buscando un abono suelto y poco aglomerado similar a la tierra, característica que en los dos abonos se cumplió.

Por otra parte, se encuentran los parámetros que se deben reportar, como es el caso de la conductividad eléctrica que indica la cantidad de sales presentes en el abono, factor que influye en el crecimiento de las plantas y que a pesar de no tener un valor de referencia establecido lo recomendable es que este sea bajo. En este caso, el biosol presenta un valor de 3,39 dS/m mientras el compostaje presenta un valor de 9.46 dS/m. Otro parámetro que se debe reportar es el porcentaje de minerales provenientes del potasio y el fósforo los cuales se deben registrar si son mayores al 1%.

En comparación el producto obtenido por digestión resulto ventajoso en parámetros como la conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico, no obstante, este proceso presenta una desventaja frente el compostaje actual, esto debido a que el compost es desarrollado directamente en el suelo y logra obtener elementos minerales dándole valores superiores al producto final obtenido. Por otra parte, de los parámetros de calidad requeridos en la NTC 5167 el

biol cumple con cada uno de los parámetros exigidos a excepción de la humedad, parámetro que no se cumplió debido a que no se completaron los días de secado necesarios para alcanzar una humedad del 20%.

En la tabla 31 se muestra la comparación de los resultados obtenidos para el biol y las características de bioles de otros trabajos.

Tabla 31
Propiedades del Biol obtenido comparado con otras investigaciones

Determinación analítica	Unidad	Valor	Intervalo de trabajo	Valor de referencia
pH	Unidad es de pH	5,75	3,75-6,91	No especificado / reportar
Densidad	g/cm ³	1	1	No especificado / reportar
Conductividad eléctrica	ds/m	0,320	6,7-15,4	No especificado / reportar
Carbono orgánico oxidable total	g/L	15,8	--	Mínimo 20
Solidos insolubles en agua	%	1,24	--	Máximo 4
Caracterización de la fracción mineral				
Nitrógeno total	g/L	0,955	1,09-4,2	No especificado / reportar
Fosforo total P ₂ O ₅	g/L	0,493	0,22-0,74	No especificado / reportar
Potasio total K ₂ O	g/L	3,17	2,93-17,2	Máximo 50

Tabla 31. Continuación

Suma N+ P ₂ O ₅ +K ₂ O ₁	g/L	4,608	--	Mínimo 40
Calcio total	g/L	4,16	1,13-5,2	No especificado / reportar
Magnesio total	g/L	0,902	0,544-1,7	No especificado / reportar
Azufre total	g/L	0,801	--	No especificado / reportar
Hierro total	mg/L	33,1	--	No especificado / reportar
Manganeso total	mg/L	10,6	--	No especificado / reportar
Zinc Total	mg/L	6,67	--	No especificado / reportar
Boro Total	mg/L	57,1	--	No especificado / reportar
Sodio Total	g/L	0,265	0,92-1,04	No especificado / reportar

Nota: El intervalo de trabajo fue obtenido a partir de las investigaciones [8], [77] y [78].

Para analizar los resultados del biol fue necesario compararlos respecto a otras investigaciones, cabe resaltar que en estas se usaban reguladores diferentes a los usados en el ensayo a escala laboratorio del biodigestor batch, las referencias de las que se extrajo la información con la que se plantearon los intervalos de comparación son [77], [8] y [78].

Al considerarse como un abono orgánico se encuentra regulado por la NTC 5167 en un apartado en el que se establecen los parámetros de calidad para el biol y el biol mineralizado, al que se le agrega una carga nutricional de un fertilizante químico para mejorar su carga nutricional. Dentro de los parámetros a garantizar en para loa abonos orgánicos líquidos se encuentra los sólidos suspendidos exigiendo que el producto contenga una carga porcentual de solidos por inferior al 4%. El contenido de carbono orgánico oxidable y el nitrógeno total, son otros parámetros que se debe de reportar y garantizar, donde el carbono debe presentarse mínimo en una cantidad de 20

g/L; en este caso el biol obtenido se encuentra por fuera de este rango reportando un valor de 15 g/L. Respecto al nitrógeno no se tiene un valor límite o un intervalo establecido, sin embargo, debe de ser reportado. Por otro lado, se puede comparar el valor contra el de otras investigaciones, notándose que está por debajo de lo registrado con un valor de 0,995 g/L, esto debido a la carga inicial de sustrato al biodigestor.

El contenido de fósforo se comparó contra los intervalos de otros trabajos, determinando que el biol obtenido en el ensayo se encuentra dentro de este rango con un valor de 3,17 g/L. El valor del potasio registrado en la NTC 5167 corresponde a un máximo de 50 g/L, valor que solo se puede obtener en bioles mineralizados puesto que el proceso de digestión no es posible alcanzar estos rangos, esto confirmado con el intervalo dado en las otras investigaciones, donde el límite superior es 17,2 g/L.

Los otros micronutrientes analizados solo se deben de reportar, es decir, que no existe un límite o un rango establecido, no obstante, se puede tener una aproximación del contenido de minerales generados durante la digestión anaerobia tomando como referencia el intervalo que se presenta en otras investigaciones. De este modo, se denota que el biol obtenido en este proyecto en su mayoría está siempre dentro o cerca del rango a especificar, cabe aclarar que esto puede variar según la carga de reguladores que se tenga, puede que en alguno de los bioles obtenidos se haya agregado algún material rico o carente en algún elemento, por tal motivo el intervalo puede diferir. El valor obtenido de la conductividad eléctrica se comparó con los valores de reportados en otros trabajos, deduciendo que existe poco arrastre de sales del material sólido.

Cabe resaltar que se deben realizar más ensayos experimentales sobre este producto para definir unas características promedio y tener un rango de comparación asertivo, sin embargo, considerando los resultados del abono obtenido durante la experimentación, los valores reportados en otras investigaciones y los valores de referencia establecidos en la NTC, se deduce que el biol obtenido se puede usar fácilmente como un agua de riego o ajustarse con ayuda de fertilizantes químicos para obtener los valores requeridos por la NTC 5167 esto teniendo en cuenta que el producto obtenido se encuentra muy por debajo de los parámetros de calidad que se deben garantizar en un abono líquido mineralizado.

8. CONCLUSIONES

Con la caracterización del proceso de disposición actual de las excretas se pudo observar que se está realizando una mala práctica que genera contaminación de los suelos y proliferación de plagas; esto se puede soportar con los resultados de los análisis realizados a la muestra de suelo, pues se obtuvieron valores atípicos en el contenido de carga orgánica y micro nutrientes tales como el boro y el zinc, los cuales reportan valores de 1,07 mg/kg y 68,46 mg/kg respectivamente, razón por la cual se considera como un suelo no cultivable pues las plantas no presentarían rendimientos satisfactorios debido a que las raíces crecerán de forma superficial y no captarán los nutrientes necesarios para su desarrollo. Adicionalmente, se identificó que las excretas generadas no poseen la relación carbono nitrógeno ideal para iniciar el proceso de digestión aerobia o anaerobia haciendo necesaria la adición de reguladores carbono nitrógeno para garantizar la relación recomendada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA) que es mayor o igual a 18.

Tras la aplicación del proceso analítico jerárquico AHP y con ayuda de software Superdesicion se estableció que el método de digestión anaerobia tipo batch presenta una preferencia del 38,35% sobre las otras alternativas evaluadas, esto debido a que, la selección de una tecnología de producción depende directamente del consumo de agua teniendo en cuenta que es el criterio de mayor importancia con una preferencia del 42,31% es por eso que las tecnologías de compostaje no son viables, quedando de lado al requerir grandes cantidades de agua para poder mantener los parámetros de operación en línea. De este modo, se establece que la digestión anaerobia permite el control de una grades masas bien sea en lotes o de forma continua, requiriendo un área disponible reducida y un tiempo de retención corto en comparación con el compostaje. Además, el agua usada en este proceso en su mayoría sin contar con la evaporada, permite su uso como un biol o agua de riego.

En cuanto a los parámetros técnicos establecidos para el proceso de digestión anaerobia, se le da gran importancia a la relación carbono nitrógeno de materia prima y a las condiciones de desarrollo de las bacterias presente en cada una de las fases; es por esta razón, que se hace estrictamente necesario el cumplimiento de parámetros como la relación carbono nitrógeno inicial,

para lo cual se debe alcanzar un valor entre 20:1 a 30:1, esto con el fin de proporcionar un espacio con los nutrientes suficientes para la digestión microbiana. Por otro lado, es importante tener un control sobre la temperatura y el pH durante la operación, ya que de estos depende el buen desarrollo de los microorganismos en sus respectivas etapas de proceso; para esto se identificaron los rangos de operación de algunos microbios presentes en cada una de las etapas de la digestión anaerobia y se definieron intervalos de operación de 35°C a 70°C y un pH que puede variar entre 5 y 8,4; los cuales se deben medir y controlar durante todo el proceso productivo.

Los costos de implementación se redujeron al máximo comparando los valores reportados en las cotizaciones que se realizaron a nivel local, seleccionando los materiales de construcción con el menor costos, teniendo en cuenta que los costos de implementación más elevados son los relacionados a la construcción y adecuación de las instalaciones donde se instalaría el sistema de producción, arrojando un total de \$ 16.692.500 pesos. Por otra parte, calcularon las áreas considerando las distancias estrictamente necesarias, esto con el fin de tener la mínima área posible, teniendo en cuenta que el costo de la mano de obra se calcula por metro cuadrado terminado con un valor de \$ 250.000/m² terminado. Al sumar los costos de implementación de mano de obra, construcción de instalaciones, instrumentación, equipos y utilería se logró un total de \$40.566.080 pesos al que se le adiciono un 3% de imprevistos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FEDEGAN, “Cifras de referencia del sector ganadero colombiano,” 2021.
- [2] J. M. Pinos-Rodríguez, J. C. García-López, L. Y. Peña-Avelino, J. A. Rendón-Huerta, C. González-González, and F. Tristán-Patiño, “Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América,” *Agrociencia*, vol. 46, no. 4, pp. 359–370, 2012.
- [3] FAO, *Código internacional de conducta para el uso y manejo de fertilizantes*. Roma, 2019.
- [4] J. Picado, A. Alfredo, and S. Agricultura, “Preparación y uso de ABONOS ORGANICOS SOLIDOS Y LIQUIDOS,” vol. I, p. 66, 2005.
- [5] FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), *Los fertilizantes y su uso*. 2002.
- [6] C. Borrero, “Abonos Organicos.”
https://www.infoagro.com/documentos/abonos_organicos.asp.
- [7] D. Gómez and M. Vásquez, “Abonos orgánicos,” Tegucigalpa, 2011. [Online]. Available: http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Abonos_organicos.pdf.
- [8] Sistema Biobolsa, “Manual de Biol,” *Man. Biol*, p. 16, 2011, [Online]. Available: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SISTEMA_BIOBOLSA_s.f.Manual_del_BIOL.pdf.
- [9] J. Garro, “El suelo y los abonos orgánicos,” Costa Rica, 2016. [Online]. Available: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F04-10872.pdf>.
- [10] D. Cubero and M. J. Vieira, “Abonos Orgánicos y Fertilizantes Químicos. ¿Son compatibles con la Agricultura?,” *Congreso Nacional agronómico*, no. Conferencia. pp. 61–67, 1999, [Online]. Available: http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_061.pdf.
- [11] G. Arévalo and M. Castellano, “Manual de fertilizantes y Enmiendas,” Zamorano, 2007.
- [12] R. Rynk *et al.*, *On-Farm Composting Handbook*, vol. 2. 2018.
- [13] FAO, *Manual de compostaje del agricultor*. 2013.
- [14] S. Garg, “Bioremediation of Agricultural, Municipal, and Industrial Wastes,” *Waste*

- Manag.*, pp. 948–970, 2019, doi: 10.4018/978-1-7998-1210-4.ch043.
- [15] J. A. Malik, “Urban Solid Waste Management Techniques With Special Reference to Vermicomposting,” pp. 53–79, 2019, doi: 10.4018/978-1-7998-1966-0.ch003.
- [16] A. Yadav and V. Garg, “Industrial wastes and sludges management by vermicomposting,” *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, pp. 243–276, 2011, doi: 10.1007/11157-011-9242-y.
- [17] A. H. M. Veeken, J. Timmermans, G. Szanto, and H. V. M. Hamelers, “Design of passively aerated compost systems on basis of compaction-porosity-permeability data,” *Orbit 2003, Org. Recover. Biol. Treat. Proc. 4th Int. Conf. Adv. a Sustain. Soc. 30 April – 2 May 2003, Perth, Aust.*, no. May, pp. 1–11, 2003.
- [18] Andalucía Luz, “3. Sistemas Y Técnicas Para El Compostaje,” *Junta de andalucia*, vol. 1, p. 7, 2000, [Online]. Available: http://digital.csic.es/bitstream/10261/16792/1/2000Compost_CIEMAT.pdf.
- [19] M. P. Bernal, J. A. Albuquerque, and R. Moral, “Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5444–5453, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.11.027.
- [20] FAO, “Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documentos Técnicos N12,” *colección Doc. técnicos*, p. 104, 2019, [Online]. Available: http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuideBiogasyBiodigestores-19-07-10.pdf.
- [21] J. Fernandez and I. Miranda, “Diseño y construcción de un biodigestor ecologico para generar biogas a partir de excreta de ganado vacuno en el tropico humedo,” Universidad Juárez autonoma de Tabasco, 2009.
- [22] W. Kossmann *et al.*, “Biogas Digest - Vol I - Biogas Basics,” vol. I, pp. 1–46, 1988.
- [23] FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, *Manual del Biogás*. Santiago de Chile, 2011.
- [24] K. F. Adekunle and J. A. Okolie, “A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion,” *Adv. Biosci. Biotechnol.*, vol. 06, no. 03, pp. 205–212, 2015, doi: 10.4236/abb.2015.63020.
- [25] Y. Lorenzo and M. C. Obaya, “La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I,” 2005.
- [26] Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, *condiciones sanitarias y de inocuidad en la producción primaria de ganado bovino y bufalino*, no. 1. Colombia, 2007, pp. 1–19.
- [27] Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, *Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia*. 2003, pp. 1–18.

- [28] Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, *modificación de la Resolución 150 de 2003*. Colombia, 2010, pp. 1–12.
- [29] G. D. E. L. A. Agenda, “GA-G-17 Guía toma de Muestras de Suelo para Análisis Químicos y Físicos.” p. 16, 2019.
- [30] ISO/IEC, “ISOTools,” *Sistemas de gestión de calidad*.
<https://www.isotools.org/normas/calidad/iso-iec-17025/>.
- [31] Agrosavia, “GA-G-19 Guía para la Toma de muestra abonos organicos.” p. 12, 2019.
- [32] ICA, *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación*. Bogotá, 1992.
- [33] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “Productos para la industria agrícola, orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo NTC-5167,” Bogotá, Colombia, 2004. [Online]. Available:
http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/1compostaje_5normalizacion/BIBLIOGRAFIA/Bib_Norma_Tecnica_Colombiana.pdf.
- [34] L. Barbaro, M. Karlanian, and D. Mata, *Importancia del pH y la conductividad eléctrica(CE) en los sustratos para plantas*, INTA. Buenos Aires: Ministerio de Agroindustria, 2018.
- [35] A. Prada - Matiz and C. Cortés Castillo, “La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: Una alternativa de aprovechamiento integral,” *Orinoquía*, vol. 14, no. 2, 2010.
- [36] E. Fajardo and E. Sarmiento, “Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de *Saccharomyces cerevisiae*,” Universidad Pontificia Javeriana, 2007.
- [37] Ó. Sanclemente, M. García, and F. Valencia, “Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña (*Saccharum officinarum*),” *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.*, 2011.
- [38] T. A. Escorcía, “El análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado,” Pontificia universidad javeriana, 2008.
- [39] ELSEVIER, “Scopus Guía rápida de referencia.” .
- [40] J. Nafar and A. Ortiz, “DETERMINACIÓN DE UNA ALTERNATIVA VIABLE PARA EL APROVECHAMIENTO DEL LACTOSUERO GENERADO POR LA EMPRESA QUESILLOS ARMERO GUAYABAL,” Fundación universidad de America, 2021.
- [41] T. L. Saaty, “Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process,” pp. 15–35, 2001, doi:

- 10.1007/978-94-015-9799-9_2.
- [42] SEMARNAT and SAGARPA, *Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México*. Mexico, 2010.
- [43] IGAC, “Cundinamarca, entre los 10 departamentos del país con mayor sobrecarga agropecuaria,” 2019. <https://www.igac.gov.co/es/noticias/cundinamarca-entre-los-10-departamentos-del-pais-con-mayor-sobrecarga-agropecuaria> (accessed Mar. 16, 2021).
- [44] P. E. A. Vélez Correa and S. Pimentel Murillo, “Diseño a escala de un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de residuos líquidos y sólidos con alto contenido de materia orgánica,” 1997.
- [45] L. Rodriguez, “VIABILIDAD TÉCNICA PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS – FORSU,” p. 67, 2014.
- [46] G. Bartzas and K. Komnitsas, “An integrated multi-criteria analysis for assessing sustainability of agricultural production at regional level,” *Inf. Process. Agric.*, vol. 7, no. 2, pp. 223–232, 2020, doi: 10.1016/j.inpa.2019.09.005.
- [47] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Decreto 1090*. 2018, pp. 2–4.
- [48] A. Irazustabarrena and G. Ortiz, “Tendencias de futuro en el medio ambiente industrial: tecnologías y escenarios,” *Econ. Ind.*, vol. VI, no. 342, p. 19, 2001.
- [49] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución No. 1519*. Colombia, 2017, p. 154.
- [50] F. Pérez, “Planificación y elaboración de proyectos,” *Cons. Estatal Estud. Med.*, p. 18, 2015, [Online]. Available: <http://agora.ceem.org.es/wp-content/uploads/documentos/proyectos/manualproyectos.pdf>.
- [51] C. V. Ramirez Molinares, “Los presupuestos: sus objetivos e importancia,” *Rev. Cult. Unilibre*, pp. 1–12, 2018.
- [52] T. Saaty, “How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, pp. 9–26, 1990, doi: 10.1007/978-1-4419-6281-2_31.
- [53] L. Castro, L. Plata, and D. Rivera, “Jerarquización de tecnologías para el aprovechamiento industrial del subproducto de la digestión anaerobia del bagazo de fíque Hierarchization of technologies to industrial use of byproduct from fique ’ s bagasse anaerobic digestion,” no. 2, 2012.

- [54] L. Caicedo, J. Fonseca, and G. Rodriguez, "Criterios para la selección de un sistema de tratamiento de residuos y su aplicación a las vinazas de la industria alcohólica," *Ing. e Investig.*, vol. 0, no. 34, pp. 3–8, 1996.
- [55] C. Parra López, J. Calatrava Requena, and T. De Haro Giménez, "Evaluación comparativa multifuncional de sistemas agrarios mediante AHP: Aplicación al olivar ecológico, integrado y convencional de Andalucía," *Econ. Agrar. y Recur. Nat.*, vol. 5, no. 9, pp. 27–55, 2005, doi: 10.7201/earn.2005.09.02.
- [56] Creative Decisions Foundation, "Tutorial on Hierarchical Decision Models (Ahp)," 2017. https://superdecisions.com/manuals/index.php?section=2_8.
- [57] P. Marquez, J. Diaz, and F. Cabrera, "Factores que afectan al proceso de Compostaje," 2017.
- [58] Vermican, "Manual De Vermicompostaje," 2005.
- [59] S. N. de A. (SENA), "Biodigestor tipo salchicha o taiwan.pdf," in *El biodigestor de plastico familiar*, p. 18.
- [60] P. A. Jorge Montalvo, L. F. Ortiz Dongo, J. L. Calle Maraví, L. A. Téllez Monzón, M. F. Césare Coral, and L. Visitación Figueroa, "Transformación del nitrógeno durante el compostaje de bosta de caballo," *Prod. y Limpia*, vol. 13, no. 2, 2018, doi: 10.22507/pml.v13n2a9.
- [61] E. Vanegas Cárdenas, J. Mariscal Moreno, M. Camargo Valero, and B. Aristizábal Zuluaga, "Digestión anaerobia de residuos de poda como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios," *Energética*, vol. 0, no. 46, pp. 29–36, 2015.
- [62] FAO and BEFS, *Manual de usuario: Residuos agrícolas y residuos ganaderos*. 2014.
- [63] A. Pasinato, "Manejo de Efluentes y estiércol en el engorde a Corral," *Inst. Nac. Tecnol. Agropecu.*, p. 4, 2010.
- [64] Instituto Técnico Agropecuario - ICA, *Cartilla práctica para la Elaboración de Abono orgánico líquido fermentado en producción ecológica*. Bogotá, 2016.
- [65] DIEGO DE LA MERCED JIMÉNEZ, "EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO TIPO CONTINUO," Universidad de veracruz, 2012.
- [66] J. Callejas Hernández, F. Prieto García, V. E. Reyes Cruz, Y. Marmolejo Santillán, and M. A. Méndez Marzo, "Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de

- recuperación de fósforo,” *Acta Univ.*, vol. 22, no. 1, pp. 11–18, 2012, doi: 10.15174/au.2012.304.
- [67] R. Pontón, “Diseño De Un Sistema Para La Obtención De Biol Mediante Los Residuos Sólidos Orgánicos Generados En El Cantón Joya De Los Sachas,” Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, 2010.
- [68] Supertanques, “Supertanque HighTank 2000L Reforzado Negro Mate.” <https://www.supertanques.com.co/product-page/supertanque-hightank-2000l-reforzado-1>.
- [69] Homecenter, “Humboldt Tanque de 1.000 Litros.” <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/316067/Tanque-de-1000-Litros/316067> (accessed Jun. 09, 2021).
- [70] Mercadolibre, “Mezclador De Cemento Y Pintura Einhell Tc-mx 1400.” https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-560039399-mezclador-de-cemento-y-pintura-einhell-tc-mx-1400-_JM (accessed Jun. 11, 2021).
- [71] Homecenter, “Escalera Certificada Tipo Plataforma en Aluminio 4 Pasos de 1,20 Metros Tipo IA de 136 Kilogramos de Resistencia.” <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/338685/?cid=494566&=INTERNA> (accessed Jun. 09, 2021).
- [72] Mercadolibre, “Mesa hidraulica.” [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-524272146-mesa-hidraulica-de-tijera-_JM#reco_item_pos=0&reco_backend=machinalis-seller-items&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-seller_items-above&reco_id=6cc55b8b-630b-48f8-a59f-4bc095455408.
- [73] Mercadolibre, “Caneca plastica.” [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-569200727-caneca-plastica-nueva-de-25-litros-con-tapa-para-multiusos-_JM?attributes=COLOR_SECONDARY_COLOR%3AUm9qbw%3D%3D&quantity=1.
- [74] Mercadolibre, “Termometro Digital.” [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-553907592-termometro-digital-para-nevera-refrigerador-sonda-pilas-_JM?matt_tool=90507667&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=11537579407&matt_ad_group_id=109266425741&matt_match_type=&matt_network=g&mat

- t.
- [75] Mercadolibre, “Higrometro.” [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-581506325-higrometro-suelos-mide-temperatura-0a-50c-y-humedad10-98-_JM?matt_tool=19390127&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic.
- [76] Mercadolibre, “medidor digital de ph con atc ph-metro.” [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-592697645-medidor-digital-de-ph-con-atc-ph-metro-buffer-baterias-lcd-_JM?matt_tool=44486290&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=11537840152&matt_ad_group_id=115404097631&matt_match_type=&matt_network=g&m.
- [77] O. Tang, L. Quipuzco, and W. Baldeón, “Evaluacion De La Calidad De Biogas Y Biol a Partir De Dos Mezclas De Estiercol De Vaca En Biodigestores Tubulares De Pvc,” *Fac. Ciencias la UNALM*, p. 8, 2011.
- [78] A. Medina, L. Quipuzco, and J. Juscamaita, “EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE BIOL DE SEGUNDA GENERACIÓN DE ESTIÉRCOL DE OVINO PRODUCIDO A TRAVÉS DE BIODIGESTORES,” *Univ. Nac. Agrar. La Molina*, vol. 76, no. 1, pp. 116–124, 2015, doi: 10.21704/ac.v76i1.772.
- [79] E. Vivanco, R. Yaya, and R. Chamy, *Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales*. 2018.
- [80] savia, “Antibiograma,” 2019. <https://www.saludsavia.com/contenidos-salud/otros-contenidos/antibiograma> (accessed Jul. 30, 2021).
- [81] E. Yamid, G. González, C. Eduardo, and C. Badillo, “Tecnura Application to batch process control,” pp. 189–204, 2014.
- [82] K. Mendoza, “Preparación, uso y manejo de abonos orgánicos,” *Inst. naciaonal inovación graria*, pp. 1–20, 2018, [Online]. Available: http://ciaorganico.net/documypublic/502_pub_p682_pub.pdf.
- [83] J. Cabos, C. B. Bardales, C. A. León, and L. A. Gil, “Evaluación de las concentraciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo,” *Arnaldoa*, vol. 26, no. 3, pp. 1165–1176, 2019, doi: 10.22497/arnaldoa.263.26321.
- [84] FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura),

- “Propiedades químicas: Capacidad de Intercambio Catiónico,” *Portal de Suelos de la FAO*. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/> (accessed Jul. 30, 2021).
- [85] Medlineplus, “Coprocultivo,” *definición de coprocultivo*. <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003758.htm>.
- [86] UABDivulga, “El digestato: de residuo a recurso en un paradigma descentralizado,” *Barcelona Investigación e innovación*, 2018. <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/el-digestato-de-residuo-a-recurso-en-un-paradigma-descentralizado-1345680342040.html?noticiaid=1345777050813>.
- [87] M. Ochoa and J. Urrutia, “Uso De Pollinaza Y Gallinaza En La Alimentacion De Rumiantes,” *Inst. Nac. Investig. For. Agrícolas y Pecu.*, pp. 1–6, 2007, [Online]. Available: <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/308/161.pdf?sequence=1>.
- [88] RAE, “Pastura RAE.” <https://dle.rae.es/pastura>.
- [89] Topoequipos S.A, “¿ QUE ES TOPOGRAFÍA ?” <http://www.topoequipos.com/dem/ques/terminologia/que-es-topografa> (accessed Jul. 30, 2021).
- [90] Wordreference, “viruta,” *Definición de Viruta*. <https://www.wordreference.com/definicion/viruta>.
- [91] *Manual Estructuración del Trabajo de Grado*. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

GLOSARIO

AEROBIO: Proceso de respiración de macro y microorganismos donde se requiere de oxígeno para llevar a cabo la transformación de material orgánico e inorgánico.[12]

ANAEROBIO: “Es un proceso realizado por microorganismos que trabajan en ausencia de oxígeno transformando compuestos orgánicos en compuestos menores como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano.”[79]

ANTIBIOGRAMA: “El antibiograma es una prueba de laboratorio de microbiología, que tiene como objetivo evaluar la respuesta de un microorganismo a uno o a varios antimicrobianos o antibióticos.”[80]

BATCH: Mecanismo de producción que consiste en alimentar con todo lo necesario para que se lleve a cabo en un tiempo de retención establecido el proceso y así obtener un producto.[81]

BIOL: “Es un abono orgánico líquido de producción cacera que contiene nutrientes y hormonas de crecimiento como producto de la fermentación o descomposición anaeróbica (sin oxígeno) de desechos orgánicos de origen animal (estiércol) y vegetal, enriquecido con sales minerales. Su uso está indicado en el tratamiento foliar en los diferentes cultivos, especialmente hortalizas.”[82]

BIOSOL: Hace referencia al producto solido que se obtiene durante el proceso de digestión anaerobia y que después de un proceso de secado puede ser utilizado como abono orgánico.[83]

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO: Es la capacidad de retención de nutrientes en la superficie del suelo o abono.[84]

COMPOST: Hace referencia al abono orgánico obtenido durante el proceso de compostaje.[13]

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA: Es la medida que representa la capacidad de un material de permitir el paso de la electricidad.[32]

COPROCULTIVO: Es el análisis donde se usa una muestra de excremento para determinar si hay existencia de algún microorganismo patógeno en el metabolismo del animal.[85]

DIGESTATO: Es la mezcla de productos orgánicos y minerales que se obtiene durante el proceso de digestión anaerobia, está conformada por una fase liquida y una fase solida conocidas como biol y biosol respectivamente.[86]

FOLIAR: Con este término se identifican los abonos que ayudan en el proceso de fertilización de las plantas aplicándolo directamente sobre las hojas utilizando diferentes mecanismos de riego.[8]

HUMUS: Es una mezcla de materia orgánica, con tonalidad oscura que es resultado de la descomposición de lombrices o microorganismos.[13]

POLLINAZA: “Es una mezcla que contiene estiércol de aves de corral (pollos), paja, viruta, aserrín o cascarilla de arroz dependiendo de que material se utiliza como cama para las aves al interior del corral.”[87]

POTRERO: Sinónimo de pastura, prado o campo de gran extensión donde se alimenta el ganado.[88]

TOPOGRAFÍA: Es la ciencia encargada de estudiar y describir gráficamente los comportamientos de la superficie de la tierra.[89]

VIRUTA: Es considerada como un material residual en el proceso de carpintería, este se obtiene en forma de láminas delgadas extraídas durante el cepillado.[90]

ANEXOS

ANEXO 1. INFORMACIÓN PRINCIPAL DE LAS ECUACIONES DE BÚSQUEDA

Información principal de la bibliometría de la ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”

Descripción	Resultados
PRINCIPAL INFORMACIÓN ACERCA DE LA DATA	
ESPACIO DE TIEMPO	2000:2021
Fuentes (revistas, libros, etc)	54
Documentos	76
Años promedio desde la publicación	5,49
Promedio de citas por documento	21,32
Citas promedio por año por documento	3
Referencias	3510
CONTENIDO DEL DOCUMENTO	
Palabras claves extra	871
Palabras claves de los autores	287
AUTORES	
Autores	362
Apariciones de los autores	377
Documentos de un solo autor	2
Documentos de varios autores	360
COLABORACIONES DE LOS AUTORES	
Documentos de un solo autor	2
Documentos por un autor	0,21
Autores por documento	4,76
Co-autores por documento	4,96
Índice de colaboración	4,86

Nota: Resumen de información proporcionada por el software Bibliometrix acerca de la búsqueda Manure AND “Fertilizer production”

**Información principal de la bibliometría de la ecuación de búsqueda
Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas**

Descripción	Resultados
PRINCIPAL INFORMACIÓN ACERCA DE LA DATA	
ESPACIO DE TIEMPO	2004:2021
Fuentes (revistas, libros, etc)	69
Documentos	93
Años promedio desde la publicación	4,71
Promedio de citaciones por documento	10,44
Citas promedio por año por documento	1,758
Referencias	3578
CONTENIDO DEL DOCUMENTO	
Palabras claves extra (ID)	744
Palabras claves de los autores	269
AUTORES	
Autores	413
Apariciones de los autores	472
Documentos de un solo autor	3
Documentos de varios autores	410
COLABORACIONES DE LOS AUTORES	
Documentos de un solo autor	3
Documentos por autor	0,225
Autores por documento	4,44
Co-autores por documento	5,08
Índice de colaboración	4,56

Nota: Resumen de información proporcionada por el software Bibliometrix acerca de la búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas.

**Información principal de la bibliometría de la ecuación de búsqueda
“Anaerobic digestion” AND “Animal manure”**

Descripción	Resultados
PRINCIPAL INFORMACIÓN ACERCA DE LA DATA	
ESPACIO DE TIEMPO	2000:2021
Fuentes (revistas, libros, etc)	174
Documentos	335
Años promedio desde la publicación	5.77
Promedio de citaciones por documento	36.11
Citas promedio por año por documento	4.547
Referencias	17516
CONTENIDO DEL DOCUMENTO	
Palabras claves extra (ID)	1193
Palabras claves de los autores	863
AUTORES	
Autores	1193
Apariciones de los autores	1446
Documentos de un solo autor	16
Documentos de varios autores	1177
COLABORACIONES DE LOS AUTORES	
Documentos de un solo autor	16
Documentos por autor	0,281
Autores por documento	3,56
Co-autores por documento	4,32
Índice de colaboración	3,69

Nota: Resumen de información proporcionada por el software Bibliometrix acerca de la búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

Información principal de la bibliometría de la ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”

Descripción	Resultados
PRINCIPAL INFORMACIÓN ACERCA DE LA DATA	
ESPACIO DE TIEMPO	2000:2021
Fuentes (revistas, libros, etc)	215
Documentos	382
Años promedio desde la publicación	7,83
Promedio de citas por documento	25,3
Citas promedio por año por documento	2,862
Referencias	18346
CONTENIDO DEL DOCUMENTO	
Palabras claves extra (ID)	2711
Palabras claves de los autores	1125
AUTORES	
Autores	1305
Apariciones de los autores	1609
Documentos de un solo autor	33
Documentos de varios autores	1272
COLABORACIONES DE LOS AUTORES	
Documentos de un solo autor	37
Documentos por autor	0,293
Autores por documento	3,42
Co-autores por documento	4,21
Índice de colaboración	3,69

Nota: Resumen de información proporcionada por el software Bibliometrix acerca de la búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”

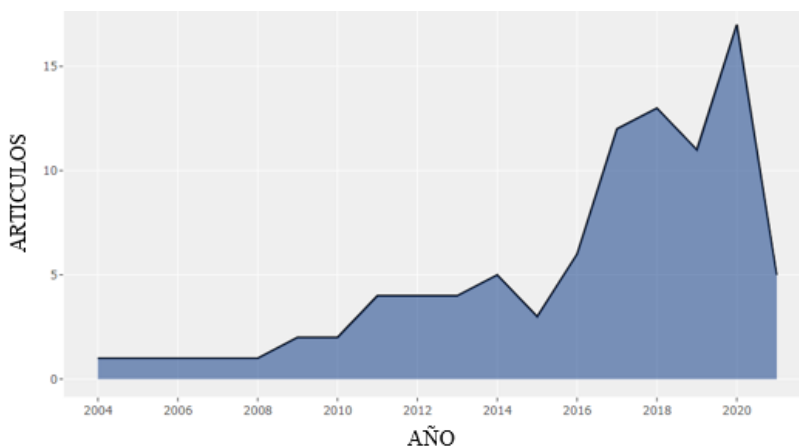
**Información principal de la bibliometría de la ecuación de búsqueda
"Organic waste recycling" AND Agricole**

Descripción	Resultados
PRINCIPAL INFORMACIÓN ACERCA DE LA DATA	
ESPACIO DE TIEMPO	2000:2021
Fuentes (revistas, libros, etc)	29
Documentos	35
Años promedio desde la publicación	7
Promedio de citaciones por documento	17,11
Citas promedio por año por documento	1,765
Referencias	1436
CONTENIDO DEL DOCUMENTO	
Palabras claves extra (ID)	413
Palabras claves de los autores	134
AUTORES	
Autores	167
Apariciones de los autores	170
Documentos de un solo autor	4
Documentos de varios autores	163
COLABORACIONES DE LOS AUTORES	
Documentos de un solo autor	4
Documentos por autor	0,21
Autores por documento	4,77
Co-autores por documento	4,86
Índice de colaboración	5,26

Nota: Resumen de información proporcionada por el software Bibliometrix acerca de la búsqueda "Organic waste recycling" AND Agricole

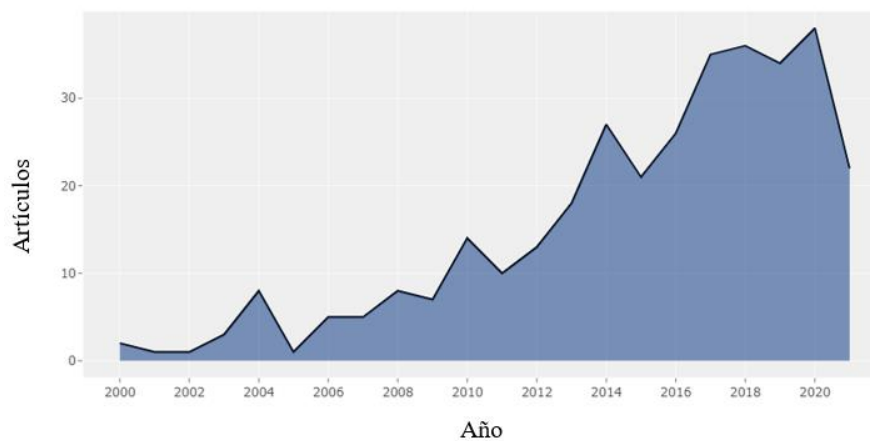
ANEXOS 2. GRAFICOS DE LA PRODUCCIÓN CIENTIFICA ANUAL

Producción científica anual de la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas



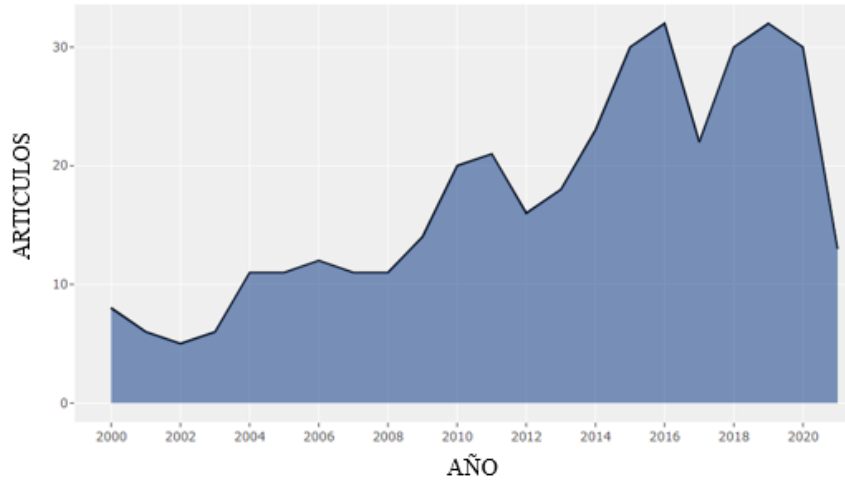
Nota: Grafico obtenido en el software Bibliometrix que muestra el crecimiento del número de artículos por año para la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas.

Producción científica anual de la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”



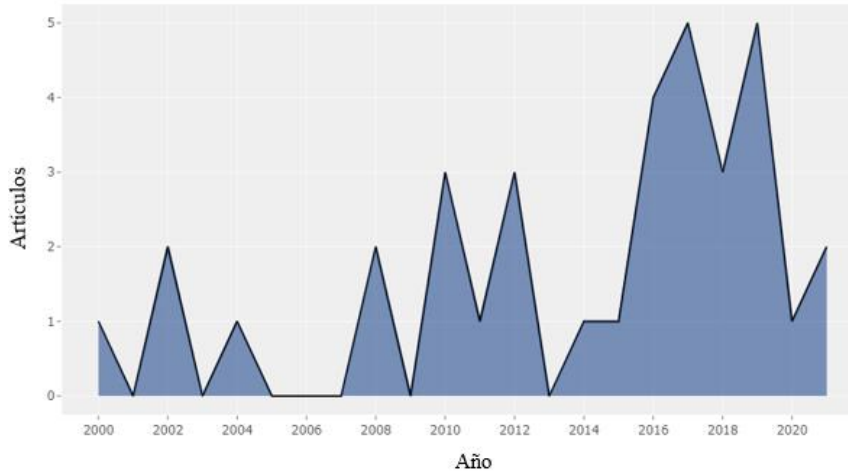
Nota: Grafico obtenido en el software Bibliometrix que muestra el crecimiento del número de artículos por año para la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

**Fuentes más relevantes para la ecuación de búsqueda
Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”**



Nota: Grafico obtenido en el software Bibliometrix que muestra el crecimiento del número de artículos por año para la ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”.

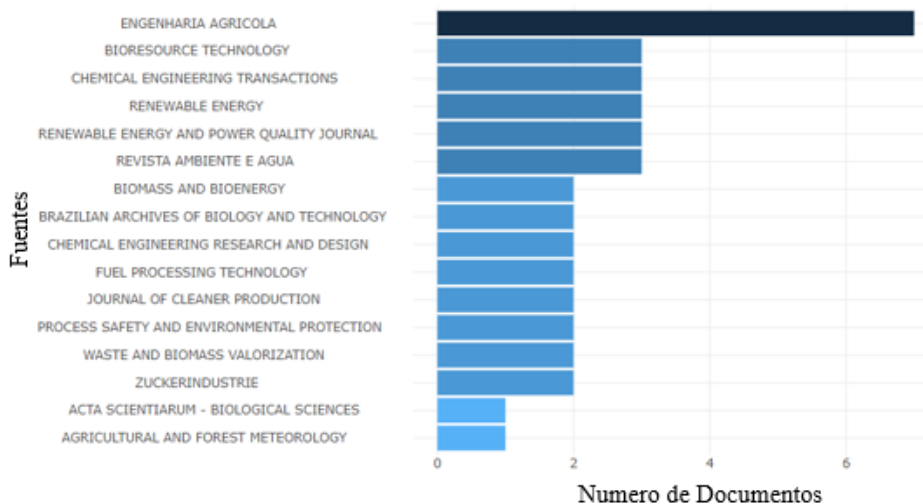
Fuentes más relevantes para la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND Agricole



Nota: Grafico obtenido en el software Bibliometrix que muestra el crecimiento del número de artículos por año para la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND Agricole.

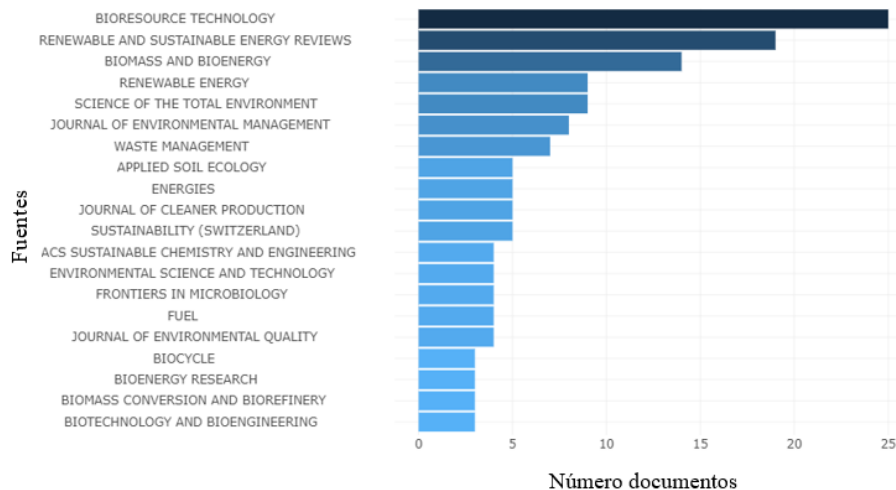
ANEXO 3. FUENTES MAS RELEVANTES PARA ECUACIÓN DE BUSQUEDA

Fuentes más relevantes para la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas.



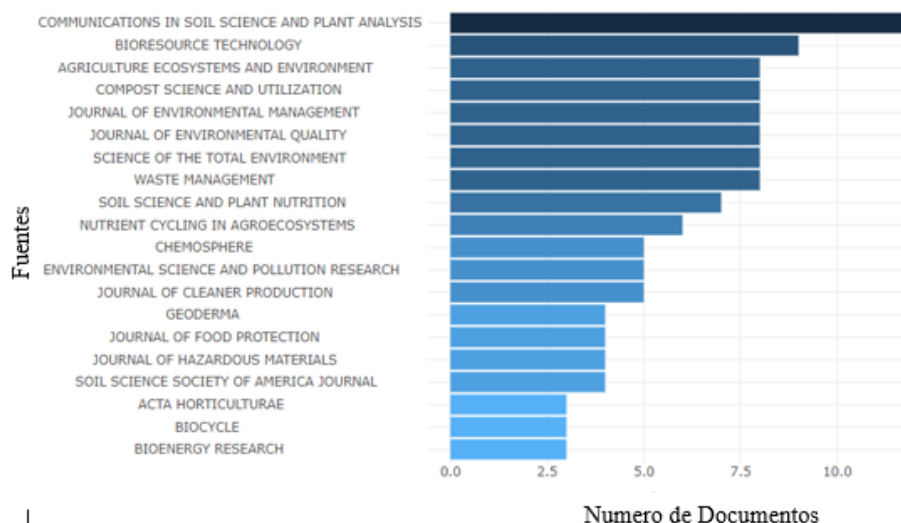
Nota: Lista de fuentes relevantes según su número de publicaciones obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas.

Fuentes más relevantes para la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”



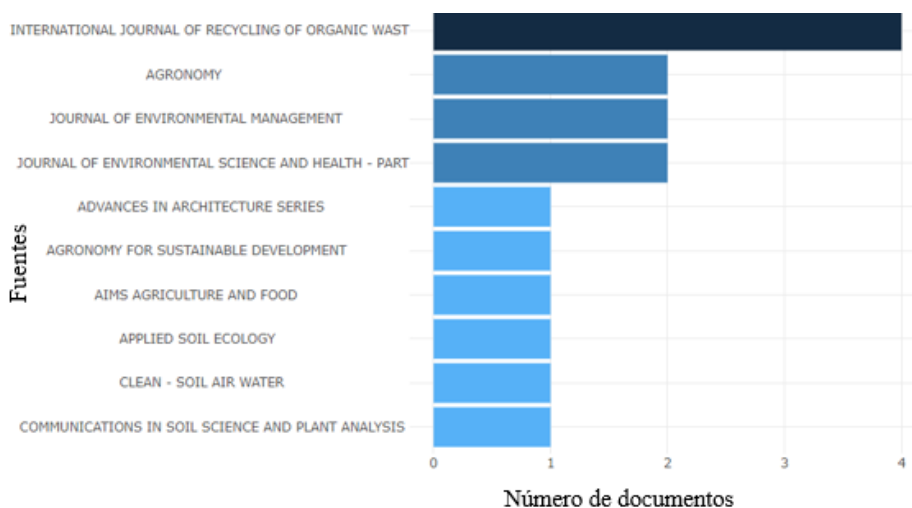
Nota: Lista de fuentes relevantes según su número de publicaciones obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

**Fuentes más relevantes para la ecuación de búsqueda
Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”**



Nota: Lista de fuentes relevantes según su número de publicaciones obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”.

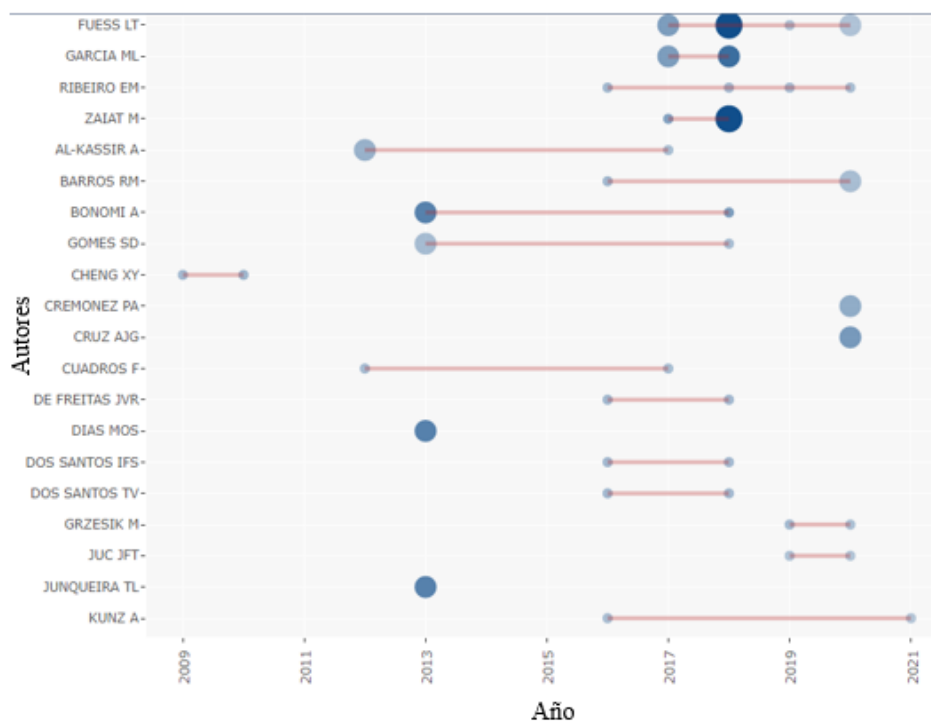
**Fuentes más relevantes para la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND
Agricole.**



Nota: Lista de fuentes relevantes según su número de publicaciones obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND Agricole.

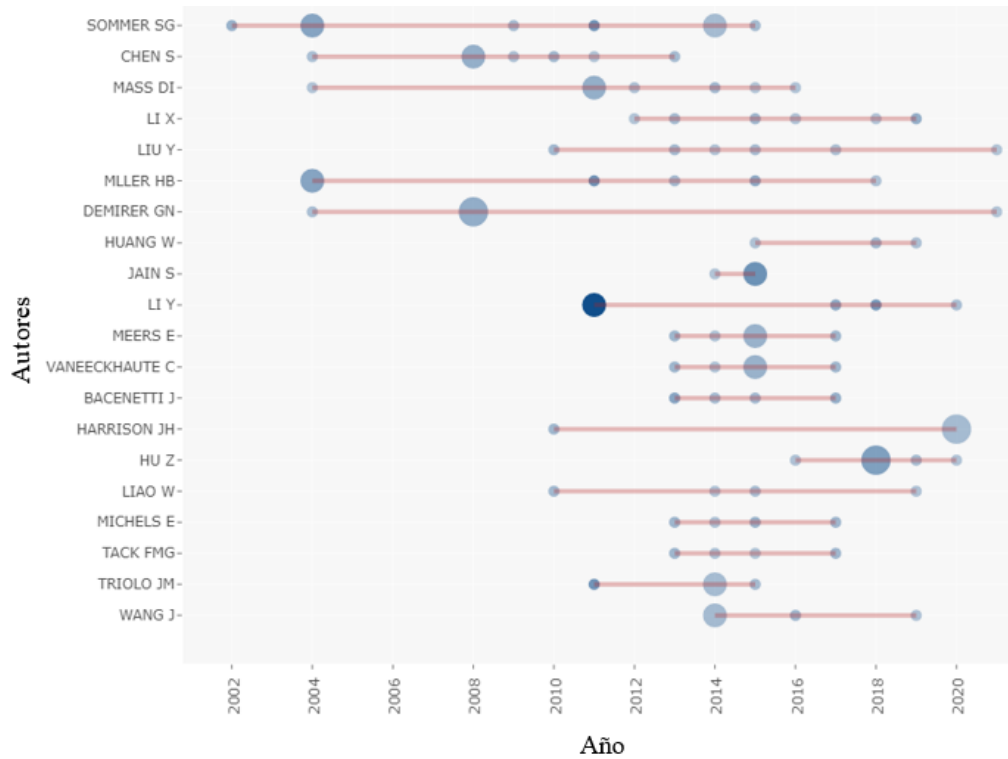
ANEXO 4. PRODUCCIÓN DE DOCUMENTOS DE LOS PRINCIPALES AUTORES

Producción de los principales autores para la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas.



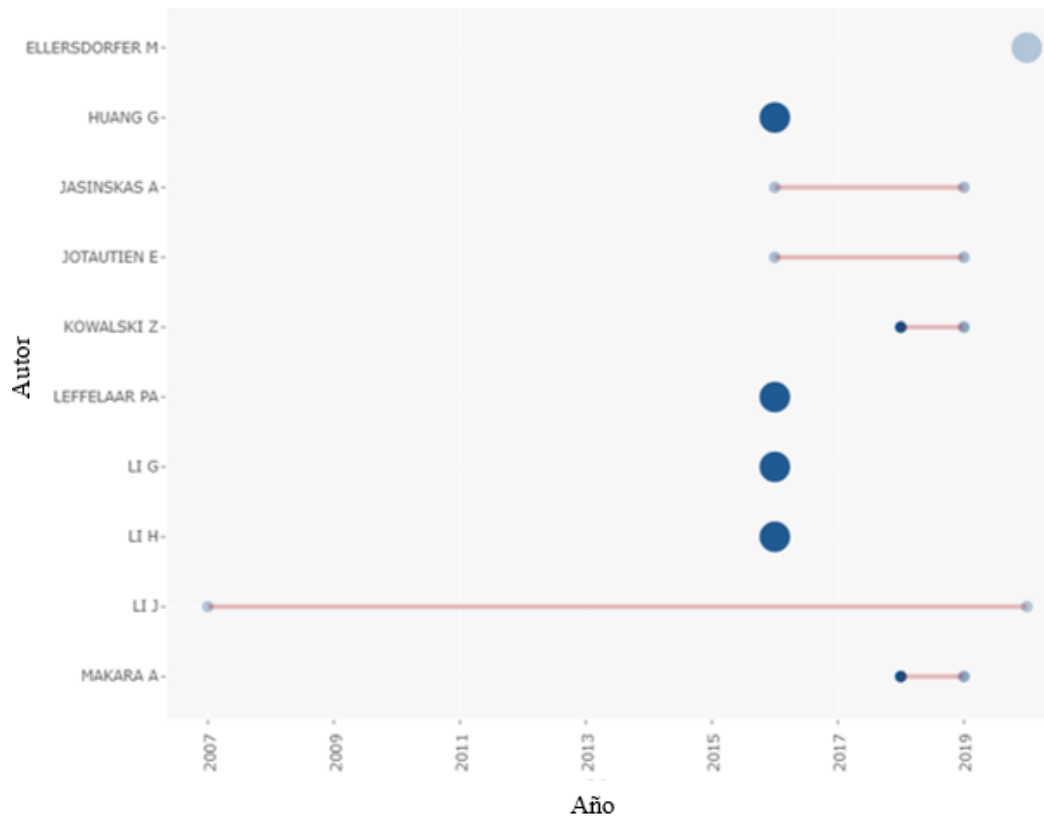
Nota: Producción de los principales autores a través de los años obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas.

Producción de los principales autores para la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”



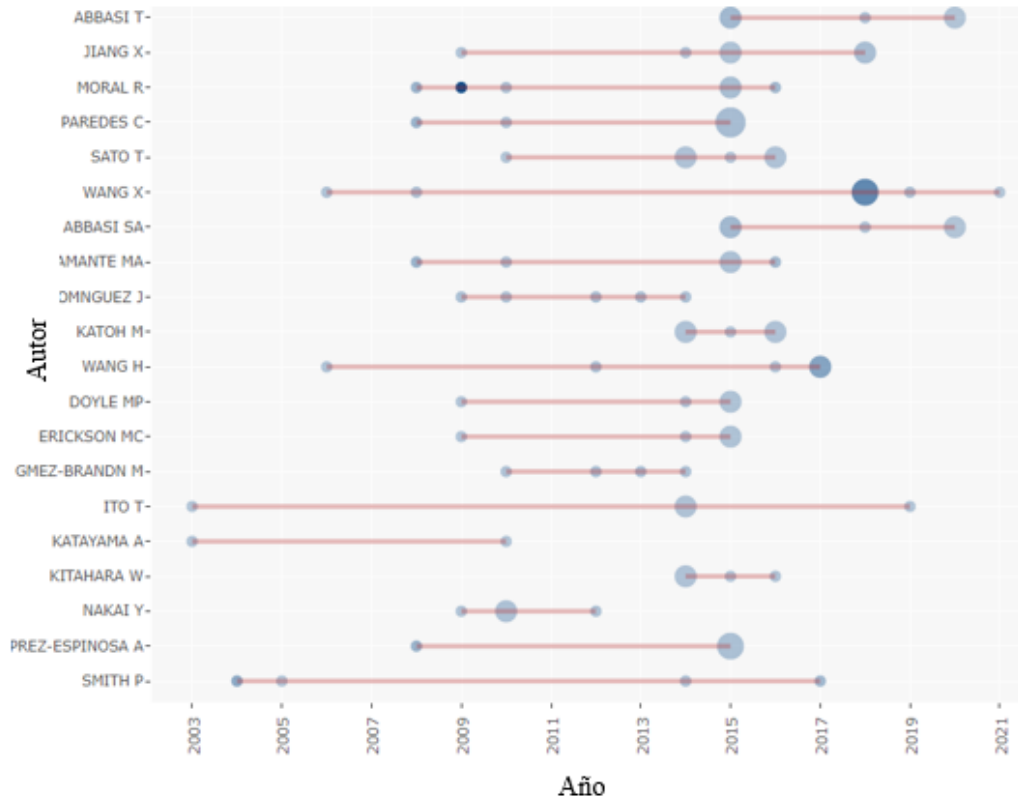
Nota: Producción de los principales autores a través de los años obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

Producción de los principales autores para la ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”



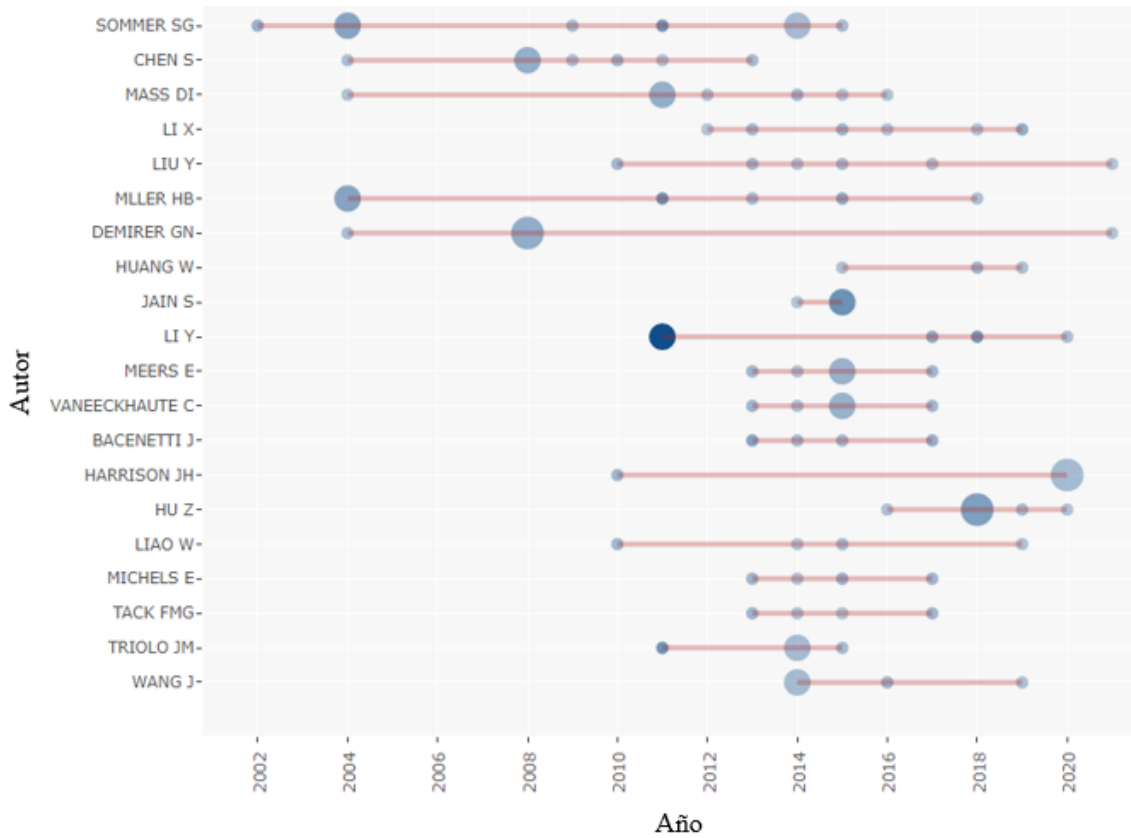
Nota: Producción de los principales autores a través de los años obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda Manure AND “Fertilizer production”

Producción de los principales autores para la ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”



Nota: Producción de los principales autores a través de los años obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”.

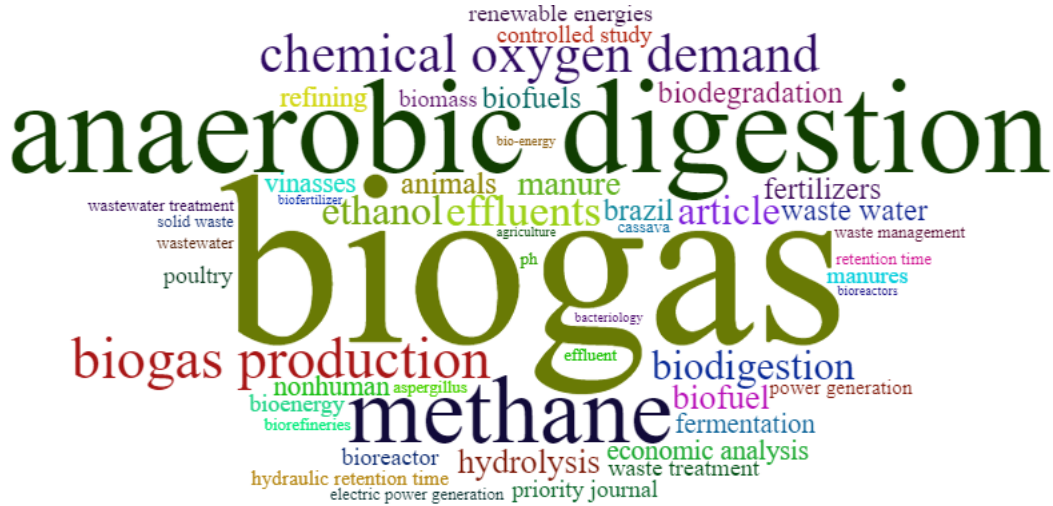
Producción de los principales autores para la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND Agricole.



Nota: Producción de los principales autores a través de los años obtenido por el software Bibliometrix para la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND Agricole.

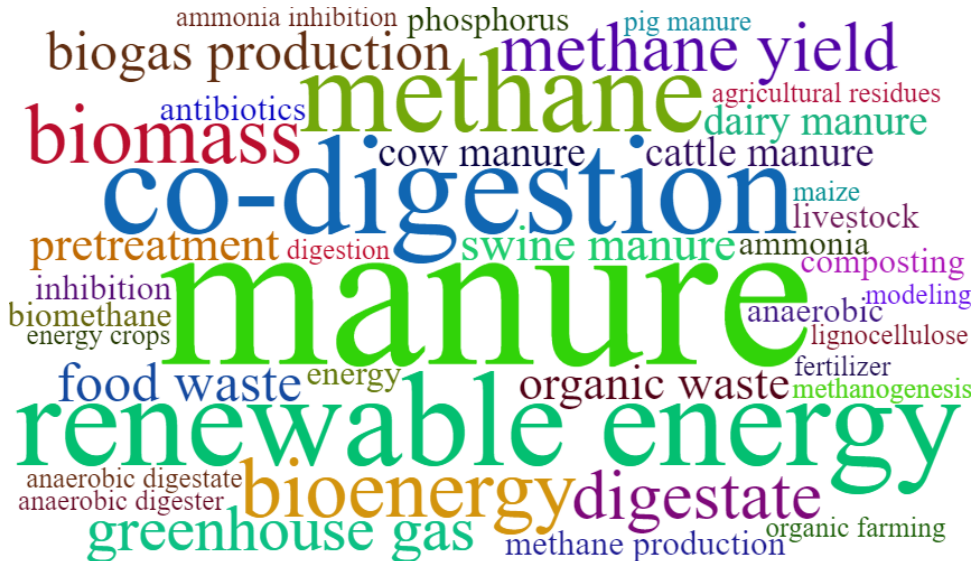
ANEXO 5. NUBES DE PALABRAS CLAVES

Nube de palabras claves de la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas.



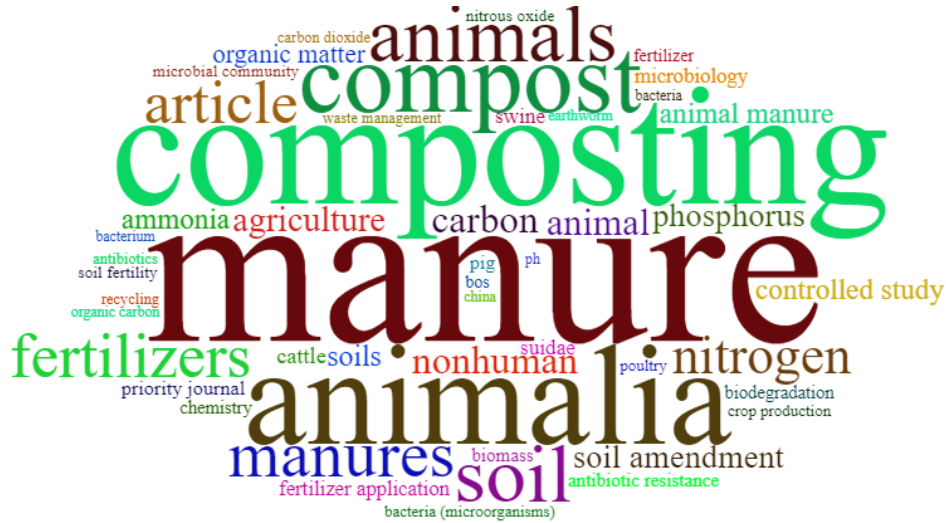
Nota: Predominancia de las palabras claves según los autores obtenido en el software Bibliometrix para ecuación de búsqueda Biodigestión AND Digestato OR Biol OR Biogás.

Nube de palabras claves de la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.



Nota: Predominancia de las palabras claves según los autores obtenido en el software Bibliometrix para ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

**Nube de palabras claves de la ecuación de búsqueda
Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”**



Nota: Predominancia de las palabras claves según los autores obtenido en el software Bibliometrix para ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”.

**Nube de palabras claves de la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling”
AND Agricole**



Nota: Predominancia de las palabras claves según los autores obtenido en el software Bibliometrix para ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND Agricole.

ANEXO 6. PRODUCCIÓN DE DOCUMENTOS POR PAISES

Producción por países de la ecuación de búsqueda Biodigestion AND Digestato OR Biol OR Biogas

Número de artículos publicados por país		Número de citaciones por país	
<i>País</i>	<i>Artículos</i>	<i>País</i>	<i>Total, citaciones</i>
Brasil	173	Brasil	640
Italia	8	China	62
Polonia	7	Nigeria	51
Canadá	5	Alemania	38
Nigeria	5	Canadá	37
España	5	Italia	28
Albania	4	España	26
China	4	Sudáfrica	14
Suecia	4	Suecia	14
Colombia	3	Polonia	9
India	3	Albania	7
México	3	México	4
Argentina	2	Tunicia	3
Cuba	2		
Alemania	2		

Nota: Recopilación de la información de producción científica por países de 2000 a 2020 obtenida con bibliometrix de la ecuación de búsqueda Biodigestión AND Digestato OR Biol OR biogás.

Producción por países de la ecuación de búsqueda “Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

Número de artículos publicados por país		Número de citaciones por país	
<i>País</i>	<i>Artículos</i>	<i>País</i>	<i>Total, citaciones</i>
Estados unidos	136	Estados unidos	2694
China	116	Dinamarca	2195
Italia	51	Canadá	950
Dinamarca	41	España	782
Canadá	35	Italia	747
Alemania	33	China	712
España	31	Austria	549
Sur África	21	Alemania	382
Brasil	20	India	381
Turquía	19	Turquía	329
Bélgica	16	Irán	270
Suecia	16	Holanda	212
Malasia	15	Suecia	147

Continuación. Producción por países de la ecuación de búsqueda Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

Holanda	14	Corea	141
India	13	Sur África	128

Nota: Recopilación de la información de producción científica por países de 2000 a 2020 obtenida con bibliometrix de la ecuación de búsqueda Anaerobic digestion” AND “Animal manure”.

Producción por países de la ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”

Número de artículos publicados por país		Número de citaciones por país	
<i>País</i>	<i>Artículos</i>	<i>País</i>	<i>Total, citaciones</i>
Estados unidos	158	España	127,08
China	144	China	28,81
Japón	58	Estados Unidos	24,49
Pakistán	38	Reino Unido	89,17
España	33	Japón	17,74
India	32	Canadá	49,56
Corea del sur	32	Holanda	50
Italia	30	Italia	35,36
Reino Unido	29	Francia	57,83
Francia	24	Australia	57,50
Irán	24	India	15,76
Canadá	22	Dinamarca	46,8
Australia	20	Corea	14,33
Brasil	20	Austria	39
Alemania	20	Sur África	13

Nota: Recopilación de la información de producción científica por países de 2000 a 2020 obtenida con bibliometrix de la ecuación de búsqueda Vermicompost OR Compost OR Biodigestion AND “Animal manure”.

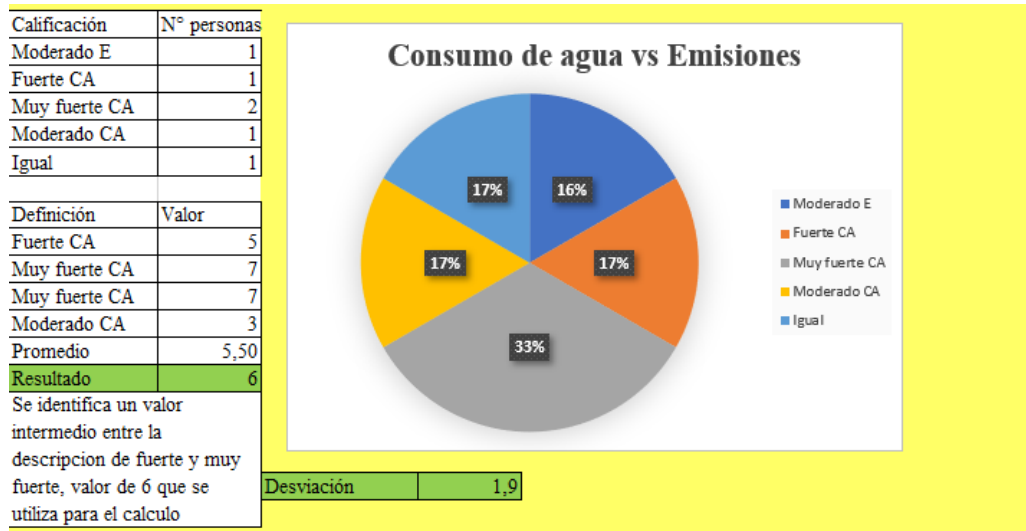
**Producción por países de la ecuación de búsqueda
“Organic waste recycling” AND Agricole.**

Número de artículos publicados por país		Número de citaciones por país	
<i>País</i>	<i>Artículos</i>	<i>País</i>	<i>Total, citaciones</i>
India	13	Dinamarca	218
España	10	Paquistán	101
Brasil	8	España	55
Francia	7	Holanda	43
Estados unidos	6	India	41
Dinamarca	5	Brasil	24
Nigeria	5	China	24
Paquistán	5	Canada	23
Corea del sur	5	Francia	16
China	4	Iran	11
Canadá	3	Suecia	9
Italia	3	Corea	4
Holanda	3		
Suecia	3		
Austria	1		

Nota: Recopilación de la información de producción científica por países de 2000 a 2020 obtenida con bibliometrix de la ecuación de búsqueda “Organic waste recycling” AND Agricole.

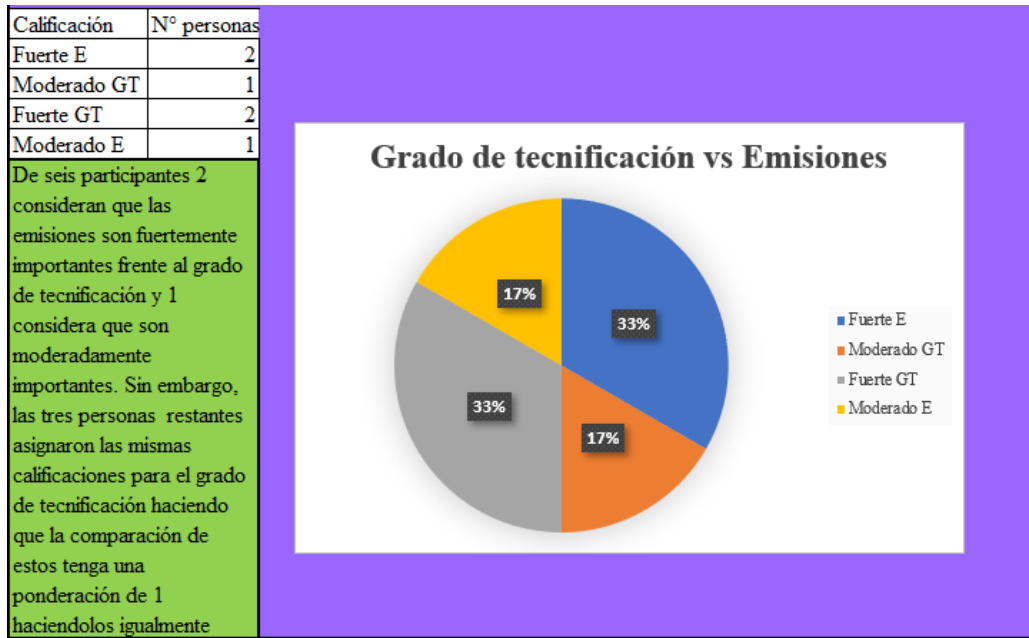
ANEXO 7. TABULACIÓN DE ENCUESTAS PARA DESARROLLO DE MATRICES MULTICRITERIO

Resultados para la pregunta de encuesta número 1



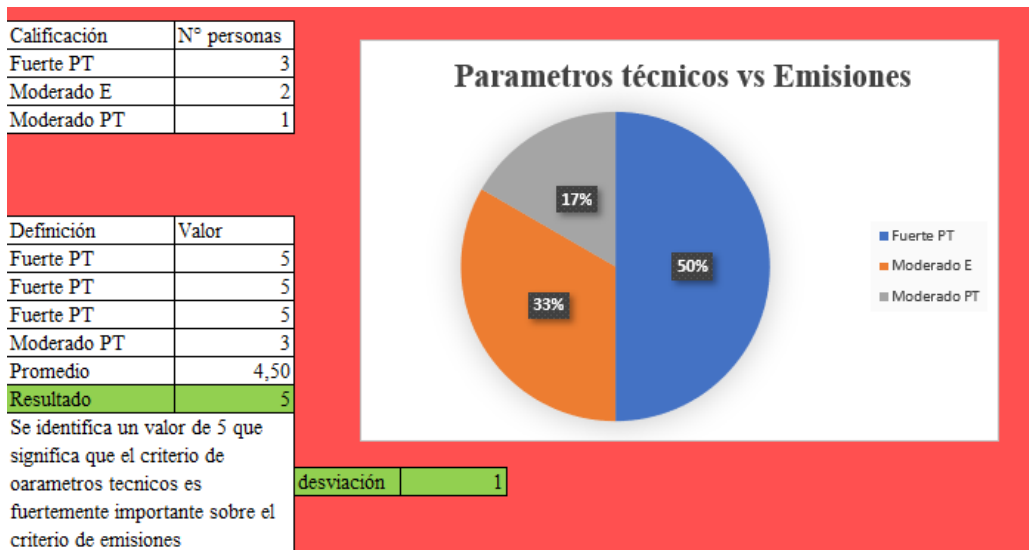
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre el consumo de agua y la producción de emisiones.

Resultados para la pregunta de encuesta número 2



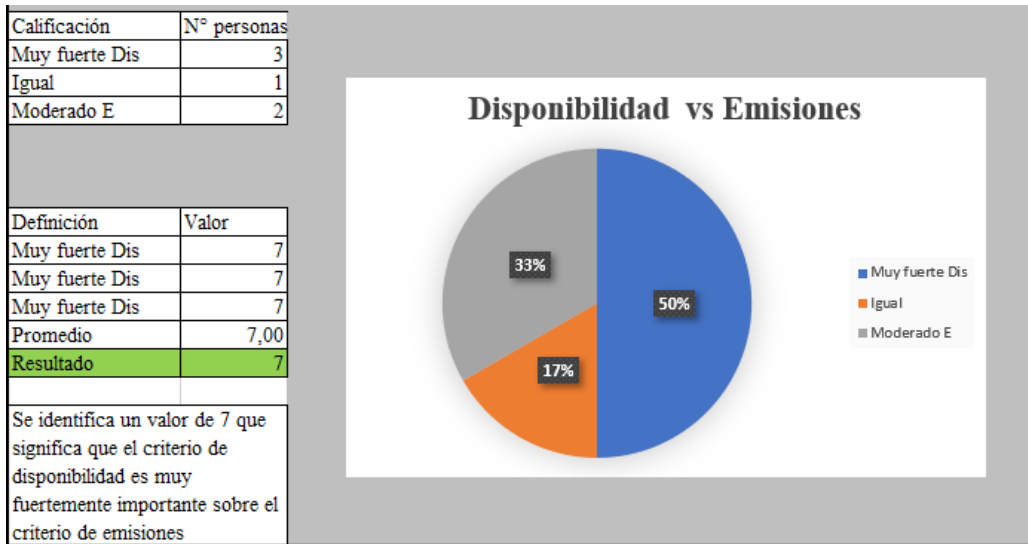
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre el grado de tecnificación y la producción de emisiones.

Resultados para la pregunta de encuesta número 3



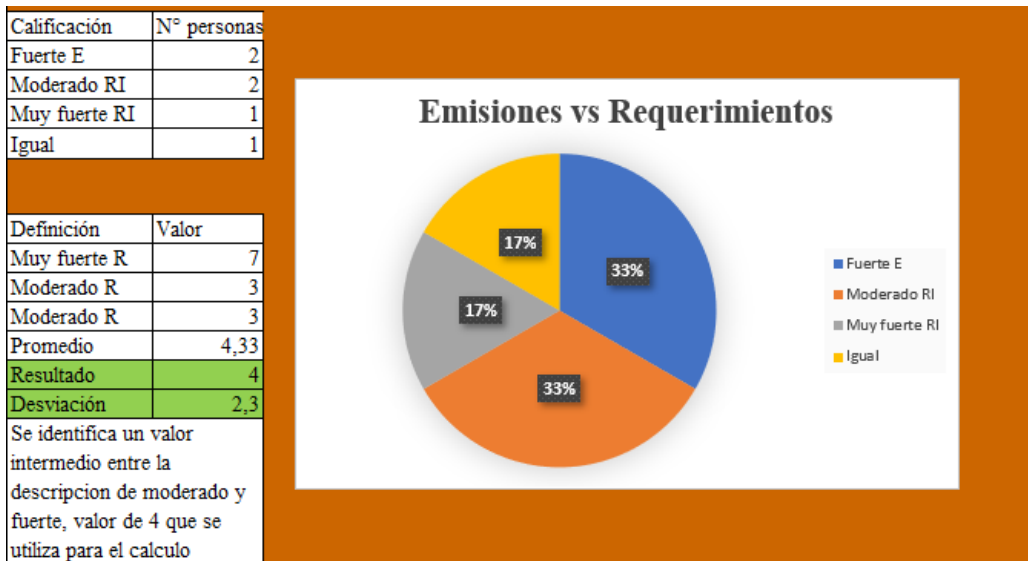
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre los parámetros técnicos y la producción de emisiones.

Resultados para la pregunta de encuesta número 4



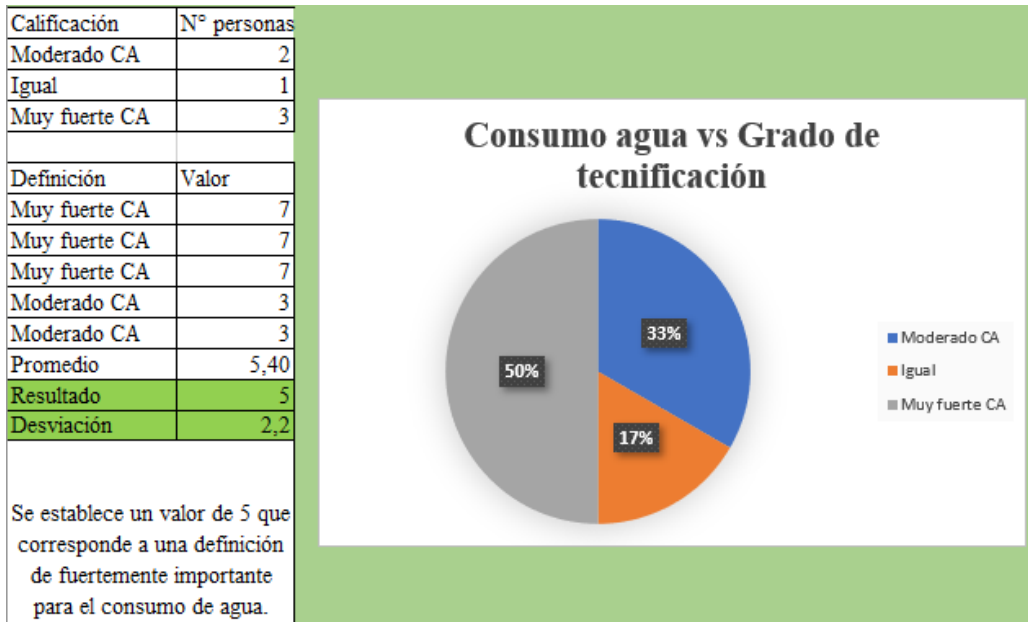
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre la disponibilidad y la producción de emisiones.

Resultados para la pregunta de encuesta número 5



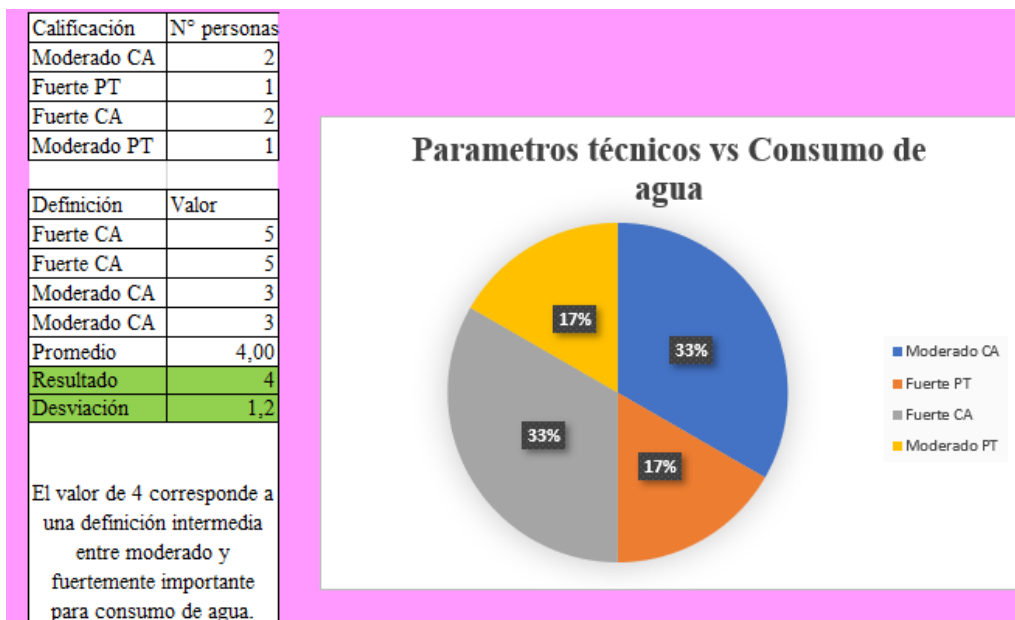
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre la producción de emisiones y los requerimientos de implementación.

Resultados para la pregunta de encuesta número 6



Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre el consumo de agua y el grado de tecnificación.

Resultados para la pregunta de encuesta número 7

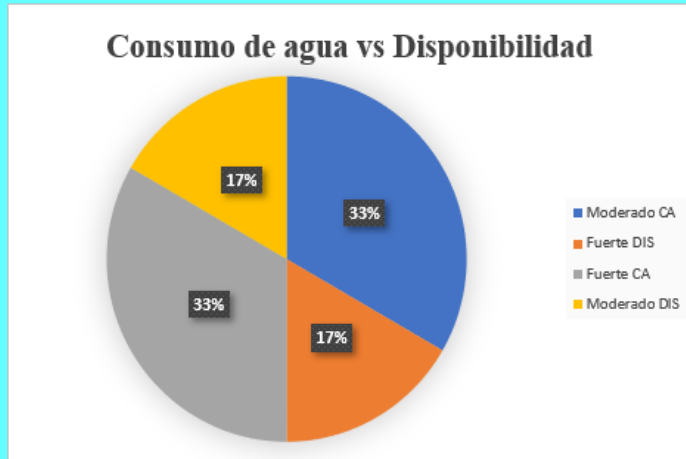


Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre los parametros técnicos y el consumo de agua.

Resultados para la pregunta de encuesta número 8

Calificación	N° personas
Moderado CA	2
Fuerte DIS	1
Fuerte CA	2
Moderado DIS	1
Definición	Valor
Fuerte CA	5
Fuerte CA	5
Moderado CA	3
Moderado CA	3
Promedio	4,00
Resultado	4
Desviación	1,2

Se identifica que el par de criterios evaluados tienen el mismo grado de importancia para los encuestados.

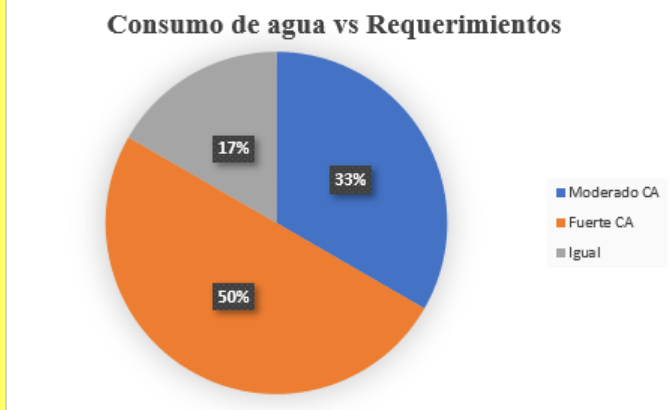


Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre el consumo de agua y la disponibilidad.

Resultados para la pregunta de encuesta número 9

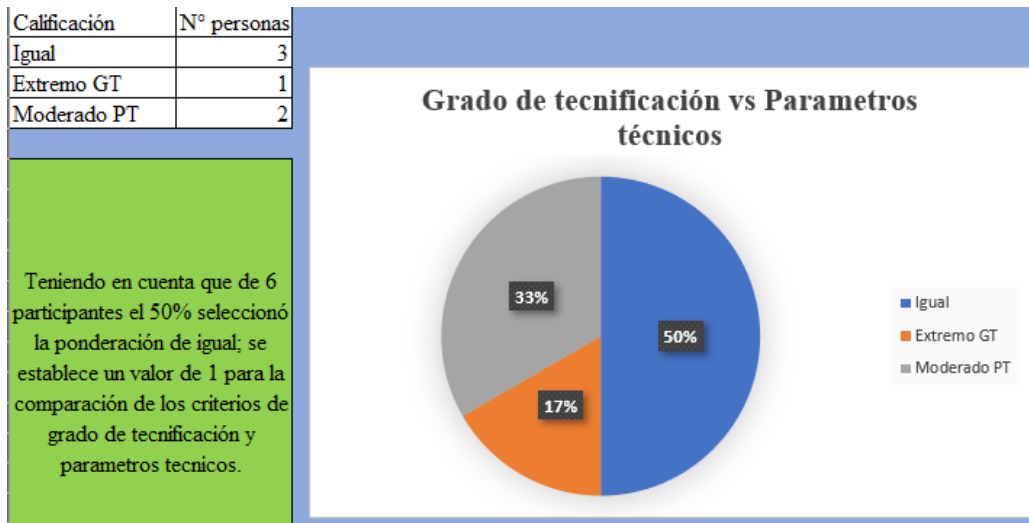
Calificación	N° personas
Moderado CA	2
Fuerte CA	3
Igual	1
Definición	Valor
Fuerte CA	5
Fuerte CA	5
Fuerte CA	5
Moderado CA	3
Moderado CA	3
Promedio	4,20
Resultado	4
desviación	1,10

Se establece un valor de 4 que corresponde a una valoración intermedia entre moderado y fuerte para disponibilidad



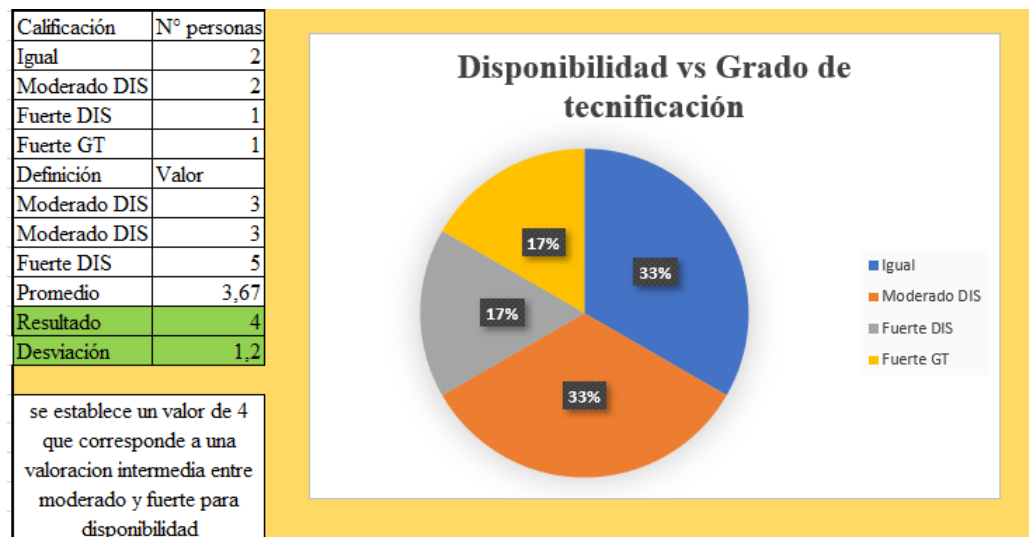
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre el consumo de agua y requerimientos.

Resultados para la pregunta de encuesta número 10



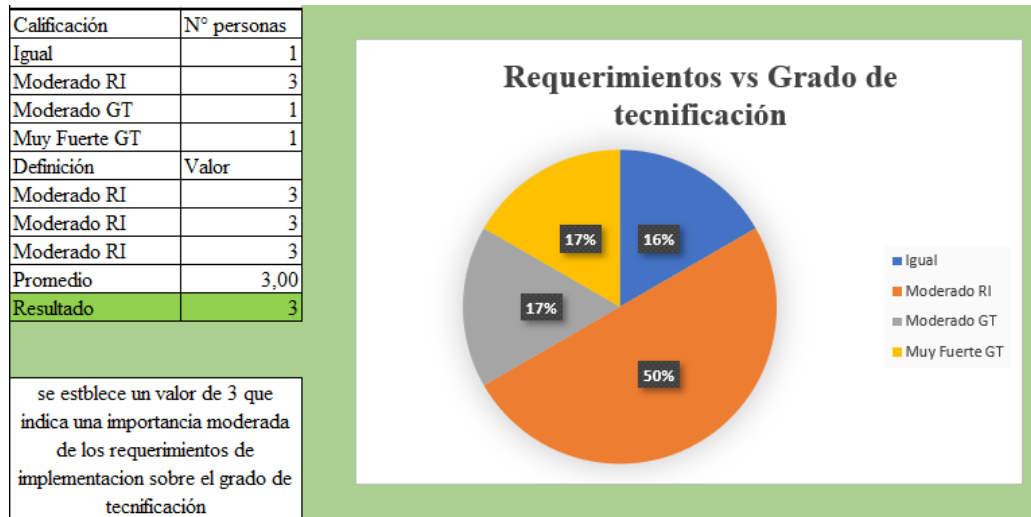
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre el Grado de tecnificación y los parametros técnicos.

Resultados para la pregunta de encuesta número 11



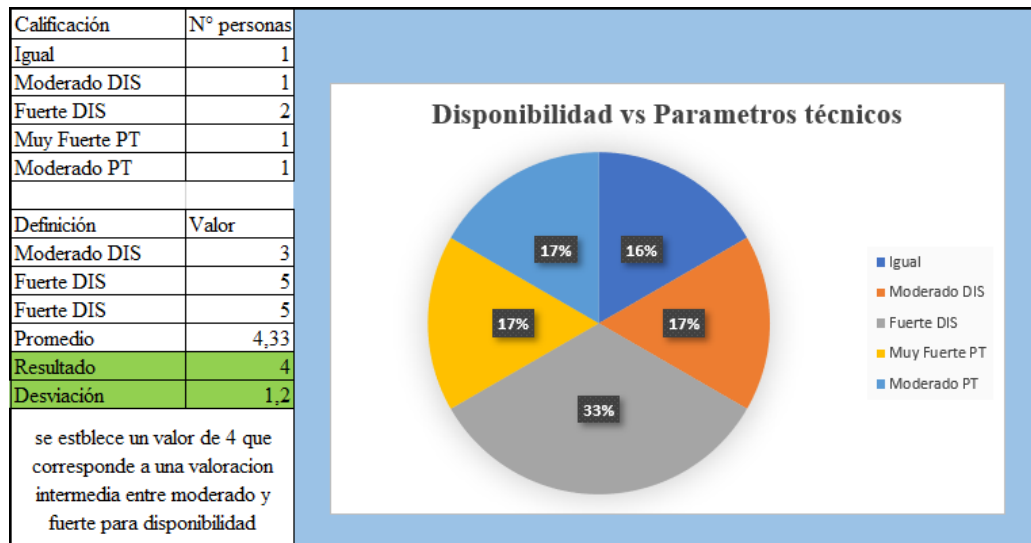
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre la disponibilidad y el Grado de tecnificación.

Resultados para la pregunta de encuesta número 12



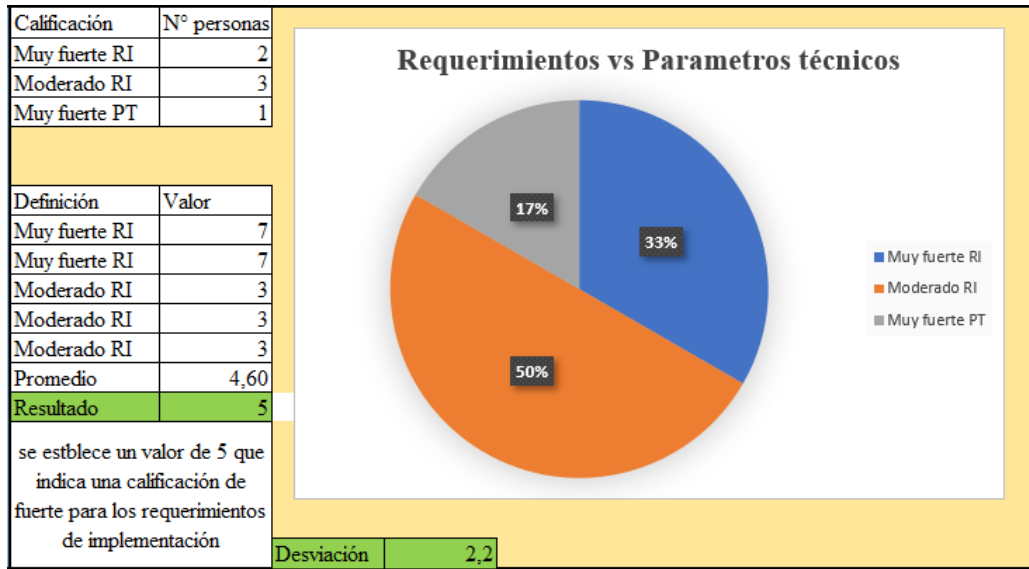
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre los requerimientos de implementación y el Grado de tecnificación.

Resultados para la pregunta de encuesta número 13



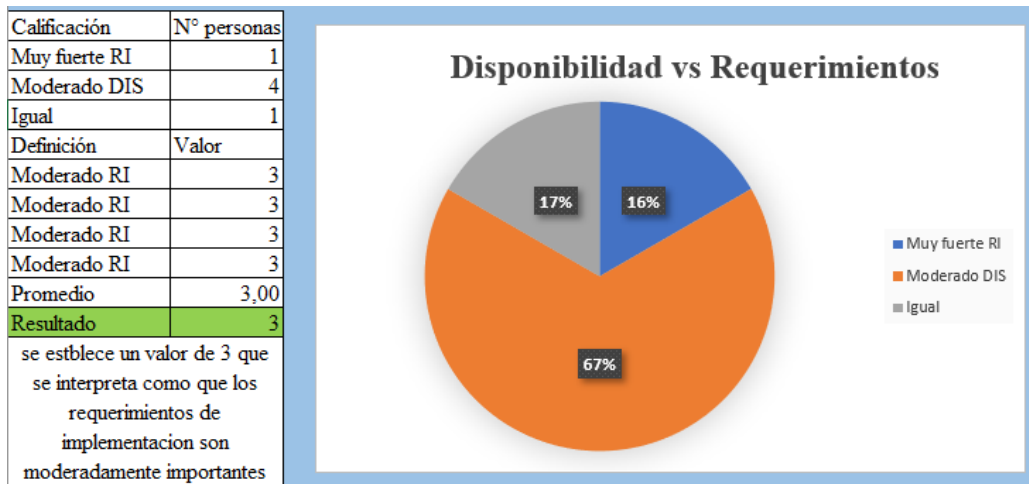
Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre la disponibilidad y los parametros tecnicos.

Resultados para la pregunta de encuesta número 14



Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre los requerimientos de implementación y los parametros tecnicos.

Resultados para la pregunta de encuesta número 15



Nota: Se presenta la tabulación respecto a las respuestas obtenidas a los profesionales respecto a la comparativa de criterios entre la disponibilidad y los requerimientos de implementación.

ANEXO 8. COMPARACIONES ENTRE ALTERNATIVAS POR CRITERIOS DE SELECCIÓN

Comparación entre alternativas según el criterio de consumo de agua

Inconsistencia	Taiwanes	Pilas pequ~	Vermicompo~
Biodigesto~	← 5	← 3	← 5
Taiwanes		↑ 3	← 1
Pilas pequ~			← 3

Nota: Gráfica sacada de la interfaz de Superdesicion que recopila los resultados alcanzados tras la elaboración de la matriz de comparación entre alternativas teniendo como base de análisis el criterio de consumo de agua.

Comparación entre alternativas según el criterio de disponibilidad de materias primas

Inconsistencia	Taiwanes	Pilas pequ~	Vermicompo~
Biodigesto~	← 1	← 1	← 3
Taiwanes		← 1	← 3
Pilas pequ~			← 3

Nota: Gráfica sacada de la interfaz de Superdesicion que recopila los resultados alcanzados tras la elaboración de la matriz de comparación entre alternativas tomando como base de análisis el criterio de disponibilidad de materias primas.

Comparación entre alternativas según el criterio de Emisión de contaminantes

Inconsistencia	Taiwanes	Pilas pequ~	Vermicompo~
Biodigesto~	← 1	← 5	← 3
Taiwanes		← 5	← 3
Pilas pequ~			↑ 3

Nota: Gráfica sacada de la interfaz de Superdesiccion que recopila los resultados alcanzados tras la elaboración de la matriz de comparación entre alternativas tomando como base de análisis el criterio de emisión de contaminantes.

Comparación entre alternativas según el criterio de grado de tecnificación

Inconsistencia	Taiwanes	Pilas pequ~	Vermicompo~
Biodigesto~	← 1	← 1	← 1
Taiwanes		← 1	← 1
Pilas pequ~			← 1

Nota: Gráfica sacada de la interfaz de Superdesiccion que recopila los resultados alcanzados tras la elaboración de la matriz de comparación entre alternativas tomando como base de análisis el criterio de grado de tecnificación.

Comparación entre alternativas según el criterio de parámetros técnicos

Inconsistencia	Taiwanes	Pilas pequ~	Vermicompo~
Biodigesto~	← 1	← 3	← 3
Taiwanes		← 3	← 3
Pilas pequ~			← 1

Nota: Gráfica sacada de la interfaz de Superdesicion que recopila los resultados alcanzados tras la elaboración de la matriz de comparación entre alternativas tomando como base de análisis el criterio de parámetros técnicos.

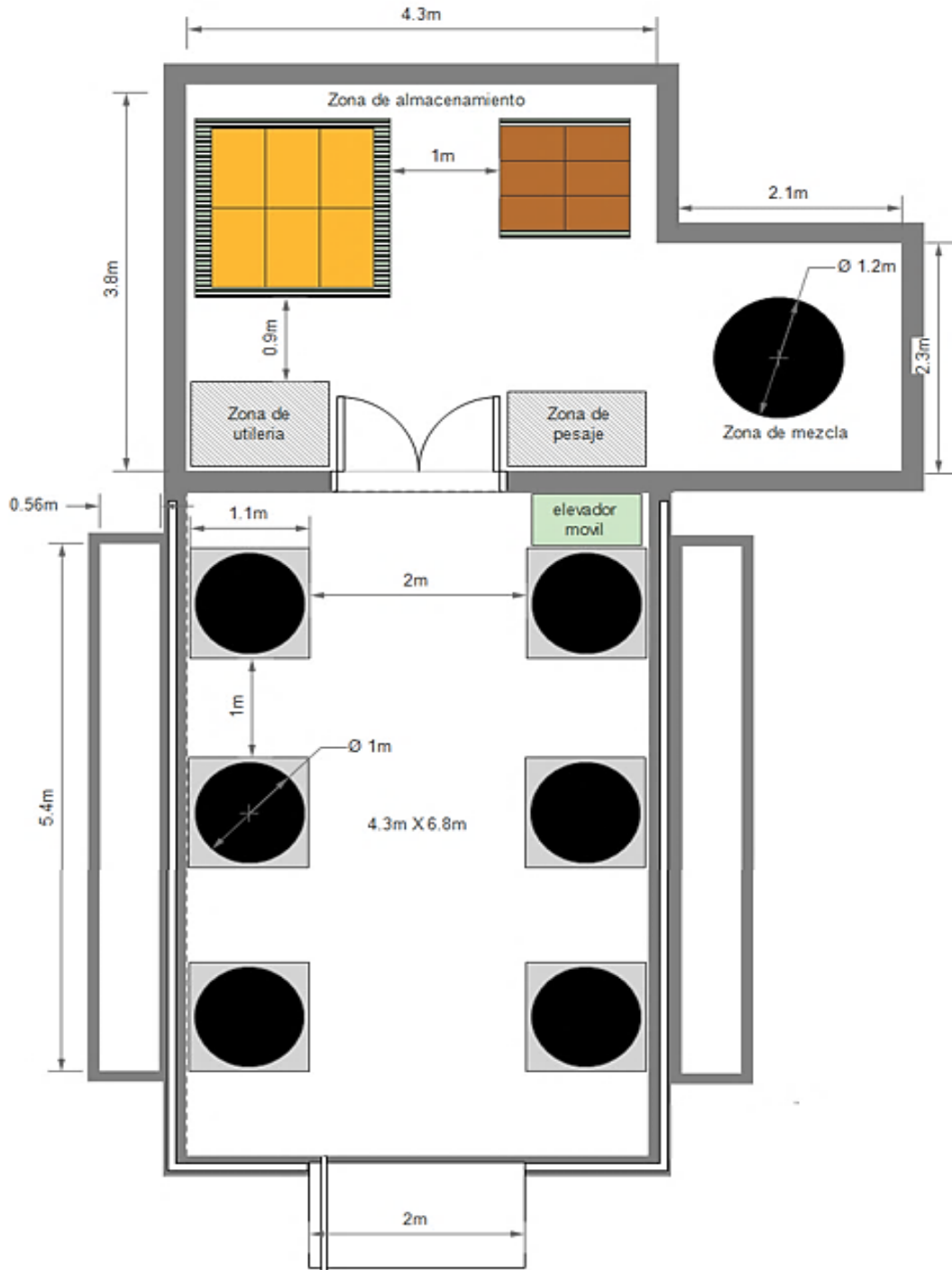
Comparación entre alternativas según el criterio de requerimientos para la implementación

Inconsistencia	Taiwanes	Pilas pequ~	Vermicompo~
Biodigesto~	← 1	↑ 3	↑ 3
Taiwanes		↑ 3	↑ 3
Pilas pequ~			← 1

Nota: Gráfica sacada de la interfaz de Superdesicion que recopila los resultados alcanzados tras la elaboración de la matriz de comparación entre alternativas tomando como base de análisis el criterio de requerimientos para la implementación.

ANEXO 9. PLOT PLANT

PLOT PLANT del proceso de digestión



Nota: Representación gráfica de cómo sería la posición de los equipos y distribución de estos en la placa a diseñar.

**ANEXO 10. CONDICIONES DE LOS MICROORGANISMOS QUE PARTICIPAN EN
CADA FASE DE DIGESTIÓN**

Características de los microorganismos que participan en cada fase


Microorganismo	Características	Fase en la que intervienen
<i>Lactobacillus</i>	Son bacterias facultativas, acidófilas, pero con buena tolerancia a pH neutros o ligeramente básicos; producen ácido láctico a partir de azúcares, se considera termófila, pero presenta buena respuesta a temperaturas entre los 20°C a 25°C.	Hidrolisis
<i>Pseudomonas</i>	Se caracterizan por ser aerobias facultativas, gramnegativas con morfología de tipo bacilo. Tienen un desempeño satisfactorio en un amplio rango de temperaturas 4°C a 40°C	Hidrolisis
<i>Sphingomonas</i>	Son bacterias aerobias facultativas gramnegativas con un metabolismo versátil que le permite procesar desde carbohidratos hasta proteínas y grasas. Crece en ambientes con temperaturas de 25°C a 45°C con pH preferiblemente neutro.	Hidrolisis
<i>Clostridium aceticum</i>	Esta bacteria predomina en la etapa de acidogénesis. Es anaerobio estricto y crece bien a temperaturas entre los 30°C y 40°C. Crece bien en un rango de pH grande pero su velocidad máxima de crecimiento la alcanza con pH que tienden a la alcalinidad.	Hidrolisis, acidogénesis y acetogénesis
<i>Bifidobacterium</i>	Bacteria grampositiva, con morfología de bacilo ramificado. Tienen mejor desempeño en medios con pH neutros y bajo desempeño en pH inferiores a 5. Se considera como un microorganismo termófilo porque muestra su máxima tasa de crecimiento entre los 35°C a 40°C	Hidrolisis, acidogénesis y acetogénesis

Continuación. Características de los microorganismos que participan en cada fase

<i>Ruminococcus</i>	Es una bacteria que se encuentra presente en el rumen de los rumiantes. Se caracteriza por ser anaerobia estricta con una morfología típica de coco (redonda), además es grampositiva. Presenta un rendimiento grato en medios con temperaturas entre 38°C a 42°C y pH entre 5,5 a 7.	Acidogénesis
<i>Cytophaga-flavobacterium-bacteroides</i>	Son bacterias gramnegativas consideradas como mesófilas, pero presentan una tasa de crecimiento aceptable a temperaturas mayores de 25°C, además son considerados como halófilos.	Acidogénesis
<i>Syntrophomonas wolfei</i>	Son bacterias anaerobias estrictas, gramnegativas que trabajan de forma simbiótica con las arqueas de la metanogénesis, no toleran pH por debajo de 5 y crecen mejor a temperaturas entre los 35°C – 40°C	Acetogénesis
<i>Syntrophobacter wolini</i>		
<i>Methanobacterium</i>	Son Archaeas que se diferencian entre sí por su morfología. Son anaerobias estrictas, razón por la cual son consideradas extremófilas. Toleran temperaturas entre 38°C a 75°C, son muy sensibles a los cambios de pH y a los descensos de temperatura.	Metanogénesis
<i>Methanococcus</i>		
<i>Methanospirillum</i>		
<i>Methanobrevibacter</i>		
<i>Methanomicrobium</i>		

ANEXO 11. COTIZACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Cotización realizada en Construrama



Construrama
REGIMEN COMUN

Direccion: Cr 10 4-46 Guaduas Cundinamarca.
Telefonos: 8466891 - 3222530779

COTIZACION

COT No: 0456
FECHA: 10/06/2021

CLIENTE:
MOSTRADOR
1000

Detalle	Cant	Vr. Unitario	Vr Total
CEMENTO CEMEX USO GENERAL AZUL	30.00	25,000	750,000
AGREGADO M3 MIXTO EN ZONA URBANA(200 PAL)	10.00	90,000	900,000
AGREGADO M3 ARENA GRIS, LAVADA EN ZONA URBANA(200 PAL)	2.00	90,000	180,000
AGREGADO M3 PIEDRA EN OBRA ZONA URBANA	23.20	90,000	2,088,000
MALLA ELECTR. 4 MM 15X15	5.00	144,000	720,000
VARILLA CORRUGADA 1/2" M No 4 (5.95 KG) P.D	107.00	29,500	3,156,500
CHIPA CORRUGADA 3/8 XKG	405.00	4,800	1,944,000
ALAMBRE RECOCIDO	60.00	6,800	408,000
BLOQUE PQÑ No 4 (ENTEROS)	1,100.00	1,450	1,595,000
ELECTROBOMBA 1 CABALLO CR- TURBO CAUDAL 5-35 L/MIN V110	1.00	222,000	222,000
TUBO SANIT GERFOR 3"x6M CERTIFICADO	.34	82,000	27,880
ADAPT PRES HEM. 3/4"	6.00	700	4,200
VALVULA BOLA 3/4 PVC ROSCAR GRIVAL 797560001	6.00	8,200	49,200
VALVULA BOLA 1" GRIVAL METALICA 797023331	6.00	40,000	240,000
TUBO PRESI 1" X GERFOR 6M RDE 13.5	4.00	31,800	127,200

ACEPTADA:


CC/NIT. _____

Subtotal: 10,684,899.2
Iva: 1,727,081
Rte Fte: (No Definida)
Total a Pagar: 12,411,980

Base	% Iva	Vr Iva	Vr Total
1,595,000	-	-	1,595,000

Nota: La empresa construrama no cobras costos asociados a transporte debido a que se encuentra ubicada en guaduas.

Cotización realizada en Industria Metacivil y Geoambiental



INDUSTRIA METACIVIL Y GEOAMBIENTAL SAS
Nit. 800.080.926-9

SERVICIOS - INGENIERÍA
CIVIL AMBIENTAL
METALMECANICA ELÉCTRICA
CONSULTORÍA - FERRETERÍA

Calle 4 N°. 7-21 Tel: 84 66 370
Cel: 310 329 27 87
E-mail: imgltda@hotmail.com
Guaduas Cundinamarca

Fecha: Junio / 10 / 2021 **COTIZACIÓN**

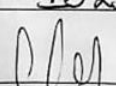
Nombre: _____ Nº 1365

Dirección: _____

CANT.	DESCRIPCIÓN	Vr. Unit.	Vr. TOTAL
133	Bultos Cemento Gris	26500	3'524.500
11	MRS Arena MIXTO	85000	935.000
2	MRS Arena Gris	85000	170.000
24	MRS Piedra	80000	1920.000
5	Concremalla 4mm	150000	750.000
107	Vanilla Corrugada 1/2	31500	3370.500
405	KIS fleje 3/8	7000	2'835.000
60	KIS Alambre Negro	7500	450.000
1100	Blques #5	1500	1'650.000
2	MRS Tlao Sanitario 3"		30000
6	Adpt Hembra 3"	30000	180.000
6	Adpt Macho 3"	24000	144.000
6	Adpt Hembra 3/4	1000	6000
6	Valvula Bola 3/4 PVC	12500	75.000
6	Registro Poso 1" Valvula PVC	16500	99.000
4	Tlao Presion 1"	37000	148.000
12	Tlao Arquitectonica 2 GMS	162000	1944.000
TOTAL \$			18'231.000

Gracias Laura Nit: 79004006-1 R.S.

FIRMA CLIENTE



FIRMA VENDEDOR

Nota: la empresa IMG no cobra costos relacionados a transporte debido a que la empresa esta ubicada en Guaduas.

Cotización realizada por PEREZ AGROPLASTI

PEREZ AGROPLASTI
 Nit. 79.004.186 - 7
 Régimen Simplificado
 Cra 5 Plaza de Mercado - Guaduas, Cund.
 Cel: 320 492 54 51

No.		
DÍA	MES	AÑO
10	06	21

CUENTA DE COBRO PEDIDO COTIZACIÓN REMISION

CLIENTE _____ TELEFONO _____
 DIRECCIÓN _____ VENDEDOR _____
 CIUDAD _____ FORMA DE PAGO _____

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN DEL ARTICULO	VA. UNIT.	VA. TOTAL
1	Rollo angeo 120x30		46000
2	Palas con cabo		43000
1	Carretilla		140.000
Sub-TOTAL \$			279.000
TOTAL \$			279.000

Nota: El local queda ubicado en el mismo municipio así que no hay gastos de envío ya que se recogería en el mismo lugar.

Cotización realizada por EMPAQUES LA FELICIDAD



EMPAQUES LA FELICIDAD

Cotización
A-000013

DIAGONAL 34A SUR #81C 23 MARIA PAZ, BOGOTA

CANASTILLAS, ESTIBAS, GUACAL POLLERO, CARTON FRUTERO Y DEMAS
EMPAQUES PARA EL AGRO

NIT	Cliente	Contacto	Fecha	Ciudad
	LUISA MARTINEZ	3222043529	8/06/2021	BOGOTA
Cel. Empresa	Dirección	Email	Descuento (%)	T. Pago
3023402142	Diagonal 34a sur # 81c 23	topo0384@hotmail.com	0	Contado

Ítem	Código	Descripción	Cantidad	Unidad	Vr. Unitario	Vr Total
1		Estiba 60x60	13		\$11.000	\$143.000

Nota: El local queda ubicado en el mismo municipio así que no hay gastos de envío ya que se recogería en el mismo lugar.

ANEXO 12. RECOMENDACIONES

Esta investigación se puede continuar, realizando un estudio relacionado con la producción de biogás, para esto se recomienda hacer un análisis sobre la cantidad de gas que se genera durante el proceso evaluando la necesidad de implementar un sistema de captación que permita darle una utilidad al biogás. Adicionalmente, se sugiere evaluar tiempos de retención más extensos, puesto que en este caso solo se llega hasta el inicio de la metanogénesis, etapa donde se maximiza la producción de biogás, para estos se deberá modificar el sistema de producción debido a que deberá implementarse un número mayor de tanques y aumentaran las áreas de producción calculadas en este trabajo.

Es recomendable realizar más ensayos experimentales del proceso para poder estandarizar las propiedades de los productos de digestión, además, se sugiere cambiar la proporción de reguladores o cambiar estos mismos, con el fin de poder observar comportamientos sobre las características del biol y biosol. A través de esta experimentación se deben relacionar las características del biol con las propiedades solicitadas por la NTC 5167 con el fin de dar un veredicto final sobre la utilidad de este como fertilizante o como un agua de riego.

Realizar un estudio de mercado para los productos obtenidos en la digestión, con el fin de realizar un análisis financiero sobre el proceso en general y presentar la idea de comercialización de estos al dueño de la finca. Cabe aclarar que todo esto se debe realizar luego de obtener productos estandarizados que cumplan con los parámetros de calidad exigidos por la NTC 5167.

Se recomienda hacer un estudio de estabilidad para los productos, biol y biosol, con el fin de documentar los cambios que experimentan las características fisicoquímicas de los mismos sometidos a diferentes condiciones ambientales para determinar el tiempo de vida útil del producto y las condiciones de almacenamiento ideales para conservarlos.

Realizar ensayos de efectividad en las que se pueda evidenciar la acción de los fertilizantes sobre las plantas que se desean cultivar y el rendimiento de los mismos.