

PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES
PROVENIENTES DE UNA PTAR DEL MUNICIPIO DE SOPÓ CUNDINAMARCA
PARA LA PRODUCCIÓN DE UN FERTILIZANTE ORGANO-MINERAL

DANIELA MARÍN BAHAMÓN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES
PROVENIENTES DE UNA PTAR DEL MUNICIPIO DE SOPÓ CUNDINAMARCA
PARA LA PRODUCCIÓN DE UN FERTILIZANTE ORGANO-MINERAL

DANIELA MARÍN BAHAMÓN

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
FELIPE CORREA MAHECHA
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

Nota de aceptación

Orientador
Ing. Oscar Lombana Charfuelán

Jurado 1
Ing. Elizabeth Torres Gámez

Jurado 2
Ing. Diana Marcela Cuesta Parra

Bogotá, D.C. Febrero, 2019

DIRECTIVAS DE LA UNVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

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 al autor.

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios y a la virgen por haberme concedido una buena salud, por ser mi guía y acompañamiento en cada paso para lograr mis metas propuestas, por sus bendiciones y amor.

A mis padres por haberme apoyado en cada momento, por sus consejos, su paciencia, por ser una fuente de motivación que me lleva a no desfallecer ante la lucha por lograr mis objetivos, por sus sacrificios, su amor y por ayudarme a cumplir mis sueños.

A mi hermana, por compartir alegrías y tropiezos y por su confianza.

A mi abuela Gladys y a mi tía Luz Dary que son mi segunda y tercera madre por sus palabras de aliento, entrega, cariño y amor.

A mi tío Miguel, por compartir momentos significativos conmigo y por estar siempre dispuesto a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A mi tía Luz Mary, por sus lindas palabras de motivación y aliento.

A mis primas Karen y Salomé, porque llenan de alegría cada día de mi vida.

A mis primos Andrés y Geraldine, quienes han estado siempre presentes, por su ejemplo de superación personal, y su cariño.

A mi abuelito Gerardo que desde el cielo me acompaña, me cuida y guía mi camino.

A toda mi familia y amigos, por compartir un poco de su tiempo, por brindarme consejos y momentos inolvidables.

A mi linda Muffita, por ser una gran compañía, llegó a nuestra casa llenando nuestros corazones de alegría y amor.

Daniela Marín Bahamón

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a la Dra. Omayra Cortés, funcionaria de la alcaldía de Sopó, por brindarme un gran apoyo en las iniciativas del proyecto y su gran interés por él.

A Laus Deus Ingeniería, por el apoyo financiero y asesoramiento en el proyecto de grado.

Al Dr. Juan Carlos Vélez, director de Prodensa por su asesoría, apoyo y excelente disposición de ayuda ante el proyecto de grado.

A la entidad Emsersopó, especialmente a la ing. Marcela Prieto por brindarme con muy buena actitud información requerida para la realización del proyecto.

A Jorge Pinilla, operario de la PTAR, por su ayuda y compartimiento de sus conocimientos a lo largo del desarrollo del proyecto.

A mi director, el ingeniero químico Felipe Correa Mahecha por guiarme, darme las herramientas adecuadas para desarrollar este trabajo, por sus valiosas correcciones y por su tiempo dedicado.

A mi asesor, el Ingeniero Químico Oscar Lombana por su seguimiento y guía en este proyecto de grado.

A Yenny, coordinadora de laboratorios de química, por su ayuda y colaboración con el préstamo de laboratorios y materiales para los análisis del proyecto de grado.

Este agradecimiento también va dirigido a todos los profesores que me han enseñado los conocimientos y valores necesarios para su realización, que marcaron con sus enseñanzas mi futuro, especialmente para Miguel Jiménez, y mi director Felipe Correa, que han creído en mi como una futura profesional de confianza y siempre estuvieron presentes para darme una mano de ayuda.

A toda mi familia por su interés y apoyo incondicional, en especial a mis padres, hermana, abuela y tía materna, quienes son mi motor para seguir adelante, siempre han tenido las palabras adecuadas para darme fuerzas en los momentos de estrés, de decaimiento, y han confiado en mí durante toda la carrera.

Un agradecimiento a mi tío Carlos Julio, Lida, primos Michelle, Carlos y Juan José por el apoyo, cariño y tenerme presente siempre en sus oraciones.

Un agradecimiento a mi tío Ancizar y Liliana por la ayuda y el cariño brindado.

Mis agradecimientos también van dirigidos a todos y cada uno de mis compañeros que me han hecho más llevaderos mis años de universidad por prestarme su ayuda cada vez que la he necesitado, por los buenos momentos vividos.

Un afectuoso reconocimiento a mi amiga Tatiana Beltrán, quien me ha ofrecido una amistad sincera, ha depositado confianza en mí y me ha ofrecido un segundo hogar junto a sus padres y hermana, quienes me han acogido con un gran cariño y me han mostrado en muchas ocasiones en su propio ejemplo lo que significa ser una grandiosa persona.

A mi amigo Andrés Felipe Maldonado, a quien estimo mucho y le debo su apoyo incondicional.

A mi amiga Stephanie Mejía por su colaboración, ánimo y por su excelente calidad humana.

A mis amigas de colegio, Andrea, por sus lindas palabras, por estar siempre en toda situación conmigo a pesar de la distancia, por confiar y creer en mis capacidades y brindarme una hermosa y leal amistad. Y Danna, por los buenos momentos vividos, por saber escucharme y brindarme una linda amistad.

Daniela Marín Bahamón

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	25
OBJETIVOS	26
1. GENERALIDADES	27
1.1 ASPECTOS TÉCNICOS Y CIENTÍFICOS	27
1.1.1 Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.	27
1.1.2 Procedencia de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.	27
1.1.3 Caracterización de lodos	28
1.1.4 Tratamiento de lodos	34
1.1.5 Compostaje.	37
1.1.6 Tipos de Compostaje.	38
1.1.7 Sistemas de Compostaje.	41
1.1.8 Abonos Orgánicos	45
1.1.9 Fertilizantes Orgánicos Sólidos	45
1.1.10 Fertilizantes Orgánico-minerales Sólidos	45
1.2 MARCO LEGAL	46
1.2.1 Normatividad de biosólidos y fertilizantes.	46
2. DIAGNÓSTICO	48
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UNA PTAR DE SOPÓ	48
2.1.1 Tratamiento preliminar	50
2.1.1.1 Trampa de grasas 1	50
2.1.1.2 Cribado grueso	50
2.1.1.3 Cribado fino	50
2.1.1.4 Desarenador.	51
2.1.1.5 Trampa de grasas 2.	51
2.1.1.6 Tanque de homogenización	52
2.1.2 Tratamiento secundario	52
2.1.2.1 Biodigestores	52
2.1.2.2 Sedimentadores	53
2.1.2.3 Tanque de desinfección	54
2.1.3 Lechos de secado	55
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL LODO	56
2.2.1 Caracterización físico-química y microbiológica	56
3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL FERTILIZANTE ORGANO-MINERAL	63
3.1 MATRIZ DE SELECCIÓN SISTEMA DE COMPOSTAJE	63
3.1.1 Establecimiento de matriz de selección.	68
3.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTACIÓN	71

3.2.1 Selección del material de soporte	71
3.2.1.1 Recolección y acondicionamiento de sustratos	73
3.2.1.2 Balance de sustratos	75
3.2.2 Construcción de tambor rotatorio	77
3.2.2.1 Acondicionamiento del lugar de trabajo	80
3.3 MONITOREO DEL COMPOSTAJE EN TAMBOR ROTATORIO	80
3.3.1 Protocolo de medición de variables	80
3.3.2 Seguimiento de variables in-situ del proceso	80
3.3.3 Seguimiento variables ex-situ del proceso	81
3.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	81
3.4.1 Resultados de mediciones variables de seguimiento	81
3.5 RENDIMIENTO ABONO/MATERIA PRIMA	93
3.6 BENEFICIOS AMBIENTALES	94
3.4.2 Análisis de la composición del compost obtenido	96
3.5 OBTENCIÓN DEL FERTILIZANTE ORGÁNICO-MINERAL	102
3.5.1 Escogencia de formulación fertilizante organo-mineral	102
3.5.2 Selección fuentes de enriquecimiento N, P, K	107
3.5.3 Balance de materia para cantidad de minerales requerida	109
4. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO	110
4.1 RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES	111
4.2 ACONDICIONAMIENTO DE MATERIALES (TRITURACIÓN)	112
4.3 FASE DE REACCIÓN	113
4.4 SECADO	122
4.5 FASE TAMIZADO (ZARANDA GIRATORIA)	122
4.6 EMPAQUETADO	123
5. FACTIBILIDAD FINANCIERA DE LA PRODUCCIÓN DEL FERTILIZANTE	124
5.1 INVERSIÓN	124
5.1.1 Adecuación de terreno	124
5.1.2 Inversión en equipos y maquinaria	124
5.2 EGRESOS	126
5.2.1 Materias primas	126
5.2.2 Mano de obra	127
5.2.3 Costos de servicios industriales	130
5.2.4 Depreciación de equipos	131
5.2.5 Mantenimiento de equipos	131
5.2.6 Costos del producto	132
5.3 INGRESOS	133
5.4 FLUJO DE CAJA NETO	134
5.5 INDICADORES	135
5.5.1 VPN	135
5.5.2 TIR. Tasa Interna de Retorno	136
5.5.2 Relación Costo/Beneficio.	136

6. CONCLUSIONES	138
7. RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	141
ANEXOS	150

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Normatividad del manejo y disposición de biosólidos y requisitos de los fertilizantes	46
Tabla 2. Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lodo y su metodología	58
Tabla 3. Valores microbiológicos máximos permisibles según caracterización de biosólidos	62
Tabla 4. Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de compostaje	64
Tabla 5. Matriz de selección de proceso de compostaje a emplear en la propuesta	70
Tabla 6. Caracterización inicial de materiales de soporte	72
Tabla 7. Composición de cada reactor, proporción de los materiales utilizados y variables iniciales en el proceso de compostaje	76
Tabla 8. Dimensiones del contenedor plástico	77
Tabla 9. Coeficientes de biodegradabilidad (Kb) para cada reactor	90
Tabla 10. Rendimiento abono/materia prima de los reactores	94
Tabla 11. Factor de emisión de dióxido de carbono según actividad	95
Tabla 12. Resultados de estimación de dióxido de carbono equivalente (kg CO ₂ -e) según actividad	96
Tabla 13. Resultados de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del compost en base húmeda	97
Tabla 14. Temperaturas y tiempos de exposición para la destrucción de microorganismos patógenos	101
Tabla 15. Principales productos agrícolas producidos en los municipios de Sabana Centro, 2015	103
Tabla 16. Total área cosechada y producción de cultivos de flores y follajes en los municipios de Sabana Centro, 2014	104
Tabla 17. Recomendaciones de N, P, K para gramíneas forrajeras clima frío (más de 2000 msnm)	107
Tabla 18. Recomendaciones de N, P, K para leguminosas forrajeras clima frío (más de 2000 msnm)	107
Tabla 19. Fuentes de enriquecimiento N, P, K, más utilizadas en fertilizantes de forraje	108
Tabla 20. Aporte en masa de fuentes de enriquecimiento en elementos N, P, K	109
Tabla 21. Masa de mezcla minerales obtenida	109
Tabla 22. Especificación técnica del triturador	112
Tabla 23. Diferencial de temperatura acorde a variación de longitud	120
Tabla 24. Inversión en adecuación de terreno	124
Tabla 25. Maquinaria y equipos necesarios	125
Tabla 26. Costo de minerales año 2018	126

Tabla 27. Costo de minerales durante 10 años	127
Tabla 28. Costos nómina año 0	128
Tabla 29. Salario total operario año 1 al año 10	129
Tabla 30. Costos de servicios industriales	130
Tabla 31. Depreciación de maquinaria y equipos	131
Tabla 32. Costo mantenimiento de equipos	132
Tabla 33. Costos del producto	132
Tabla 34. Ingresos de la planta de producción de fertilizante organicomíneral	133
Tabla 35. Ahorro en disposición de lodos anual	134

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Técnicas de tratamiento de lodos residuales	35
Figura 2. Evolución del proceso de compostaje	40
Figura 3. Estructura de pila estática con aireación forzada	42
Figura 4. Estructura de reactor tanque vertical	44
Figura 5. Diagrama de proceso planta de tratamiento de aguas residuales de Sopó, Cundinamarca	49
Figura 6. Esquema del balance de materiales iniciales	75
Figura 8. Mapa con mayor número de hectáreas Sabana Centro, 2014	102
Figura 9. Diagrama de bloques del proceso de elaboración del fertilizante organomineral	110
Figura 10. Esquema de distribución áreas de la planta de producción fertilizante	111
Figura 11. Esquema reactor escala piloto	120

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Perfil de temperaturas en los reactores a profundidad de 15 cm	82
Gráfica 2. Perfil de temperaturas en los reactores a la profundidad de 20 cm	83
Gráfica 3. Perfil de temperaturas en los reactores a la profundidad de 30 cm	84
Gráfica 4. Evolución del parámetro de pH en cada reactor	86
Gráfica 5. Comportamiento de la humedad durante el tiempo de compostaje	87
Gráfica 6. Comportamiento de sólidos volátiles durante el proceso de compostaje	91
Gráfica 7. Cantidad de materia seca en el proceso de compostaje	92
Gráfica 8. Relación entre dimensiones escala piloto con respecto al diferencial de temperatura permisible a escala laboratorio	119

LISTA DE IMAGENES

	pág.
Imagen 1. Trampa de grasas	50
Imagen 2. Sistema de cribado grueso y fino	51
Imagen 3. Trampa de grasas con estructura tubo en forma de T	51
Imagen 4. Tanque de homogenización	52
Imagen 5. Biodigestor con sistema de inyección de aire por pistón	53
Imagen 6. Sedimentadores imhoff	54
Imagen 7. Tanque de desinfección	54
Imagen 8. Evolución del proceso de deshidratación de lodos	55
Imagen 9. Cuarteo en montículos de lodo	57
Imagen 10. Muestra de lodo obtenida y llevada a análisis fisicoquímicos y microbiológicos	58
Imagen 11. Poda de césped acondicionada	74
Imagen 12. Papel periódico acondicionado	74
Imagen 13. Partes del tambor rotatorio	78
Imagen 14. Secador solar con cubierta de plástico	89
Imagen 15. Producto final empacado	93
Imagen 16. Termómetro digital portátil	155
Imagen 17. Tiras indicadoras de pH	155
Imagen 18. Balanza analítica de precisión 0,0001	156
Imagen 19. Mufla	156
Imagen 20. Desecador	157

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Sistemas y técnicas de compostaje	63
Cuadro 2. Criterios relevantes para la selección del sistema de compostaje	68
Cuadro 3. Alternativas como sistema de compostaje	69
Cuadro 4. Descripción de las partes que conforman el reactor horizontal	79
Cuadro 5. Especificación técnica secador solar parabólico	122
Cuadro 6. Ficha técnica de zaranda rotativa	123
Cuadro 7. Ficha técnica cosedora de sacos	123

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Procedimiento medición temperatura	158
Diagrama 2. Procedimiento medición de pH	159
Diagrama 3. Procedimiento medición de humedad	160
Diagrama 4. Procedimiento medición contenido de cenizas	161

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Analogía de la tasa de generación y disipación de calor	113
Ecuación 2. Factor de escalamiento	114
Ecuación 3. Tasa de generación de calor	114
Ecuación 4. Tasa de disipación de calor	115
Ecuación 5. Factor de escalamiento de acuerdo con la tasa de generación disipación de calor	115
Ecuación 6. Factor escalamiento prototipo y real	115
Ecuación 7. Factor de escalamiento simplificando términos constantes	116
Ecuación 8. Factor de forma	116
Ecuación 9. Factor geométrico cilindro	116
Ecuación 10. Factor geométrico cilindro laboratorio	117
Ecuación 11. Delta de temperatura permisible escala laboratorio	117
Ecuación 12. Volumen reaccionante escala laboratorio	118
Ecuación 13. Peso de la masa requerida a mover	121
Ecuación 14. Velocidad de rotación	121
Ecuación 15. Determinación de la potencia motor del reactor	121
Ecuación 16. Valor presente neto proyecto	135
Ecuación 17. Tasa interna de retorno del proyecto	136
Ecuación 18. Relación beneficio costo	136

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultados de caracterizaciones de biosólido y compost	151
Anexo B. Equipos e instrumentos de medición para el seguimiento de las variables	154
Anexo C. Protocolos de medición variables proceso compostaje	158
Anexo D. Balance de materiales involucrando relación c / n y humedad (inicial)	162
Anexo E. Formatos de mediciones de temperatura y pH	164
Anexo F. Minerales aplicados al abono orgánico	169
Anexo G. Flujo de caja neto evaluado en 10 años	171

GLOSARIO

ABONO O FERTILIZANTE ORGÁNICO: producto sólido o líquido formado por materia orgánica procedente de residuos animales o vegetales, destinados a suplir las necesidades nutricionales de las plantas, y cumplen una normatividad legal vigente¹.

ABONO O FERTILIZANTE ORGANO-MINERAL: producto obtenido por la combinación de materiales orgánicos y minerales, y cumplen una normatividad legal vigente².

APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS: utilización de residuos mediante actividades tales como recuperación, transformación, y rehusó de los mismos, con el fin de generar un beneficio económico, social y de reducir los impactos ambientales y los riesgos a la salud humana asociados con la producción, manejo y disposición final de los residuos³.

BIODEGRADACIÓN: proceso de descomposición de desechos orgánicos por acción de agentes externos (microorganismos), mediante el cual se eliminan compuestos nocivos y permite la restitución de elementos esenciales en la formación y crecimiento de macronutrientes⁴.

CARACTERIZACIÓN DE LODOS: estudio y determinación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lodos a transformar⁵.

COMPOSTAJE: proceso biológico controlado que consiste en la desintegración y biodegradación de la materia orgánica por la intervención de microorganismos en condiciones aerobias o anaerobias⁶.

DIGESTIÓN AEROBIA: proceso biológico realizado por diversos microorganismos, que en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica, transformándola en productos inocuos⁷.

¹ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Dirección de Desarrollo Tecnológico

² Ibid. p.5.

³ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 2676. Gestión integral de los residuos hospitalarios y similares. Capítulo II. p.2.

⁴ GALLI, C. Degradación por medios bacterianos de compuestos químicos tóxicos. Comisión Técnica Asesora en Ambiente y Desarrollo Sostenible. Buenos Aires, Argentina. 2002.

⁵ M. MAHAMUD. A. GUTIÉRREZ y H. SASTRE. Biosólidos generados en la depuración de aguas Métodos de Tratamiento. Ingeniería del Agua, Vol. 3. 1996.

⁶ YUSTE VENEGAS, Sara., PASCUAL, Raquel. La materia orgánica del suelo. Papel de los microorganismos. p. 5.

DIGESTOR: contenedor o recipiente cerrado que tiene como función provocar la degradación controlada de residuos orgánicos bajo condiciones específicas⁸.

DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS: proceso de aislar y confinar los residuos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares técnicamente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, y los daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente⁹.

ESTABILIZACIÓN DE LODOS: tratamiento de lodos que puede ser biológico, químico o de acondicionamiento para la reducción de patógenos, eliminación de olores, reducción o eliminación de la capacidad de putrefacción de la materia orgánica¹⁰.

FERMENTACIÓN: transformación de compuestos orgánicos en compuestos más simples y/o inorgánicos por la acción de microorganismos¹¹.

HUMUS: estado final de descomposición de la materia orgánica sólida por acción de microorganismos cuya composición depende del sustrato y grado de descomposición¹².

LODO O BIOSÓLIDO RESIDUAL: subproducto obtenido en la planta de tratamiento de aguas residuales, rico en materiales orgánicos. Lodo tratado con microorganismos¹³.

MATERIAL ESTRUCTURANTE O DE SOPORTE: residuos que poseen una importante carga de nutrientes, como vegetales, virutas de madera, cáscaras de frutos¹⁴.

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales. Instalaciones y procesos para tratar las aguas residuales¹⁵.

⁷ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Manual de biogás. Chile, 2011. p. 13.

⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. GTC 24. Gestión ambiental. Residuos sólidos. Guía para la separación en la fuente. 2009.

⁹ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Capítulo I. Definiciones. 2005. p.3.

¹⁰ NAVARRO PEDREÑO, José. Residuos orgánicos y agricultura. Capítulo 8. Tratamiento de lodos. p. 179.

¹¹ YUSTE VENEGAS, Sara., PASCUAL, Raquel. Op.Cit. p. 6

¹² Ibid. p.6-7

¹³ MOELLER, Gabriela., FERAT, Catalina., LÓPEZ Rafael. Aplicación del procesamiento térmico y alcalino para la desinfección de lodos residuales primarios. un estudio comparativo. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Porto Alegre. Brasil.2000.

¹⁴ ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura. 2014.

RELLENO SANITARIO: espacio donde se depositan los residuos sólidos después de haber recibido determinados tratamientos¹⁶.

RESIDUO: se refiere a materiales que no son intencionalmente producidos para el mercado, al igual que no es de uso productivo propio, de transformación o consumo por parte del generador¹⁷.

RESIDUO SÓLIDO APROVECHABLE: es un material, objeto, sustancia o elemento sólido que no tiene valor de uso para quien lo genere, pero que puede ser aprovechado para su reincorporación a un proceso productivo¹⁸.

RESUMEN

El proyecto se enfocó en el desarrollo de una propuesta de producción de un fertilizante organo-mineral, a partir de los lodos generados en una planta de

¹⁵ LIZARAZO BECERRA, Jenny Milena., ORJUELA GUTIÉRREZ, Marta Isabel. Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2013.p. 42.

¹⁶ ARISTIZABAL, Catalina., SÁCHICA, María Stella. El aprovechamiento de los residuos sólidos domiciliarios no tóxicos en Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. 2001. p. 16.

¹⁷ MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Decreto 1713 de 2002. p.12.

¹⁸ Ibid. p.12.

tratamiento de aguas residuales del municipio de Sopó, Cundinamarca; con el fin de aprovechar su potencial en nutrientes agronómicos y mitigar las emisiones de gases efecto invernadero que ocasionan al disponerse en un relleno sanitario. Esto se realizó por medio de un proceso de compostaje aerobio y su posterior combinación con minerales tipo N-P-K.

Para el desarrollo de este proyecto, se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos residuales, teniendo en cuenta los parámetros principales según la NTC 5167¹⁹, para su posterior clasificación y tratamiento. Una vez obtenidos los resultados de los análisis realizados en un laboratorio externo, se establecieron como materiales de soporte, el papel periódico y podas de césped.

Se definieron las alternativas y criterios más influyentes en el proceso por medio de una matriz de selección PUGH, en donde se concretó emplear el sistema de compostaje correspondiente a reactor horizontal con volteo, en el cual se realizaron dos réplicas para estimar la representatividad de datos. Los tres reactores fueron cargados con la misma mezcla de materiales en porcentajes: 60% lodo (32,95 kg), 39% poda de césped (8,03 kg) y 1% papel periódico (0,23 kg); logrando una relación C/N de 23,75 y un porcentaje de humedad de 58,85% al inicio del compostaje. Con la puesta en marcha del proceso, se realizó un seguimiento durante 40 días de las variables: temperatura, pH, humedad y cenizas. Una vez terminado este ciclo, se procedió a caracterizar la mezcla transformada en abono orgánico, y a introducir minerales procedentes de roca fosfórica, urea y cloruro de potasio, obteniendo un fertilizante organomineral. Los análisis obtenidos mostraron resultados de parámetros fisicoquímicos positivos: relación de C/N igual a 9,73, cenizas 55,66%, y un pH de 7,4 caso contrario en análisis microbiológicos, debido a la multiplicación de microorganismos patógenos (coliformes totales $>1000 \times 10^4$, coliformes fecales 5×10^5 y *E.coli* $1,1 \times 10^5$).

Palabras claves: lodos residuales, materiales estructurantes, reactor horizontal, compostaje aerobio, fertilizante organo-mineral.

INTRODUCCIÓN

Una de las plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Sopó, Cundinamarca genera aproximadamente 7,8 toneladas de lodos residuales

¹⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167. Colombia. 2004.

anuales, los cuales son deshidratados, estabilizados con cal y dispuestos en el relleno sanitario Mondoñedo, el cual tiene una capacidad limitada. La generación y el manejo que se le está dando a estos residuos constituyen un problema ambiental y económico debido a la contaminación que ocasiona su eliminación, incluyendo la emisión de gases efecto invernadero y al elevado costo del transporte para su disposición final, el cual tiene un costo actual de \$14.107.200 anuales²⁰. Adicional a esto, se está desaprovechando la posibilidad de reutilizar un componente que puede llegar a ser valioso de varias formas, incluyendo tener una oportunidad de negocio y valor de mercado, permitiendo un beneficio económico a la industria y afectar de forma positiva a las tarifas de agua.

Por lo anterior, se encontró necesario proponer un sistema que resultara amigable con el medio ambiente, que aprovechara su potencial orgánico, los macro y micronutrientes y la carga en microorganismos mesófilos aerobios presentes. Para ello, se realizó una valoración sobre las normativas existentes para el manejo de estos residuos y su aplicación en los suelos, involucrando procesos tecnológicos de tratamiento biológico que se aplican para disminuir su impacto ambiental.

Los objetivos de este proyecto, están dirigidos a lograr una estabilización de los lodos residuales por medio del compostaje, para lograr una degradación controlada de las sustancias orgánicas que contienen, eliminar el olor y disminuir o inactivar los microorganismos patógenos para su posible utilización como fertilizante; y en darle un valor agregado a este abono orgánico por medio de la incorporación de minerales que aportan una rica fuente de fósforo, nitrógeno y potasio, con el fin de obtener un producto (fertilizante organomineral) rico en nutrientes en formas asimilables por las plantas para estimular su crecimiento vegetativo y que contribuya en la restauración de suelos.

El presente documento se encuentra estructurado por cinco capítulos. En el primero se exponen generalidades que aplican a la propuesta a desarrollar (Marco teórico y marco legal). A partir del segundo capítulo se empiezan a desarrollar los objetivos planteados, correspondiendo así un capítulo por objetivo. Seguidamente se presentan las conclusiones del estudio y algunas recomendaciones, al igual que los anexos correspondientes.

²⁰ ALCALDÍA DE SOPÓ CUNDINAMARCA. EMSERSOPÓ. 2018.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para la producción de un fertilizante órgano-mineral a partir de los lodos residuales generados en una PTAR de Sopó - Cundinamarca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del lodo proveniente de una PTAR de Sopó – Cundinamarca.
- Evaluar el proceso de producción de un fertilizante órgano-mineral a nivel laboratorio.
- Determinar las especificaciones técnicas del proceso de producción de un fertilizante órgano-mineral.
- Evaluar la factibilidad financiera de la producción del fertilizante órgano-mineral.

1. GENERALIDADES

En este capítulo se describen las características físicas, químicas y biológicas de lodos procedentes de PTAR municipal doméstica, los tratamientos respectivos, marco legal y se profundizó en el sistema de proceso de compostaje junto a parámetros relevantes de éste.

1.1 ASPECTOS TÉCNICOS Y CIENTÍFICOS

1.1.1 Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Residuos insolubles producidos durante el tratamiento de aguas residuales y los posteriores procedimientos de estabilización de lodos, como la digestión aeróbica o anaeróbica.²¹ Las características de estos lodos dependen de la calidad de las aguas residuales y del tipo de proceso de tratamiento seguido. De manera general, están compuestos principalmente por sustancias orgánicas, que puede variar entre 45 a 90% en su composición, contienen nutrientes de plantas como nitrógeno y fósforo.²² Además, pueden proporcionar cantidades significativas de elementos potencialmente tóxicos, como metales pesados,²³ y patógenos como huevos helmintos, coliformes fecales, salmonella, protozoos y virus.²⁴

1.1.2 Procedencia de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales dependen del tipo de planta de tratamiento y las operaciones que se realizan en ésta. En la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, los lodos son generados de los procesos de sedimentación primaria, tratamiento biológico²⁵ y de tratamiento químico.²⁶

- **Lodos primarios.** Son subproductos obtenidos del tratamiento primario de aguas residuales, en el que se comprenden operaciones de cribado,

²¹ ARCAK, S., A. KARACA., E. ERDOGAN., C. TÜRKMEN. Un estudio sobre el uso agrícola potencial de los lodos cloacales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ankara. Turquía, Ankara, 2000. p. 345-349.

²² WIECHMANN, B., DIENEMANN, C., KABBE, M., BRANDT, S., VOGEL, I., ROSKOSCH, A. Sewage sludge management. Alemania, 2015. p.7-9.

²³ SINGH, RP; AGRAWAL, M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. Waste Management 28, 2008. p. 347-358.

²⁴ GASPARD, P., WIART, J., SCHWARTZBROD J. Contaminación parasitológica de los lodos urbanos utilizados con fines agrícolas. Waste Management & Research 15, 1997. p.429-436.

²⁵ AMBULKAR, A., NATHANSON, J. Sludge treatment and disposal. Encyclopaedia Britannica. 2018. P.4

²⁶ PABON, Sandra., SUAREZ, JOHN. Starting-up and operating a full-scale activated sludge system for slaughterhouse wastewater. 2009, vol.29. p.53-58.

desarenado, desengrasado y sedimentación²⁷. Los lodos recolectados a la salida de los tanques sedimentadores contienen una humedad que varía entre un 93 y 97%²⁸, por lo que es necesario someterlos a un tratamiento antes de su disposición, con el fin de disminuir su contenido de agua y estabilizarlos biológicamente²⁹. La composición de estos lodos depende de las características del área de recogida de las aguas. El lodo primario contiene generalmente una considerable cantidad de materia orgánica y son de apariencia grisácea, pegajosa y poseen un olor ofensivo³⁰.

- **Lodos secundarios.** Son llamados también como lodos activados, proceden de un tratamiento biológico de aguas residuales en ambiente químico aerobio, donde las aguas residuales son aireadas en un tanque que contiene una alta concentración de microorganismos activos capaces de degradar la materia orgánica bajo condiciones aerobias³¹. Luego, este residuo tratado, es separado por medio de un sedimentador secundario³². Entre sus características, presentan un color marrón, una apariencia floculenta y su olor no es tan relevante, tiene olor a tierra húmeda³³.
- **Lodos terciarios.** Lodos tratados mediante un acondicionamiento químico. En este tratamiento se reduce la humedad del lodo desde un 90-99% a un 65-85%³⁴, dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar, permitiendo la coagulación de éstos. Generalmente son tratados con una mínima dosificación de sales de hierro o aluminio, cal y polímeros orgánicos, con el fin de mejorar su rendimiento, impedir la rápida degradación de la materia orgánica y mitigar los malos olores³⁵.

1.1.3 Caracterización de lodos.

Determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos a partir de una metodología que incluye protocolos

²⁷ CASTRO, José M., PÉREZ, Jesús., RODRÍGUEZ, Carlos., MUÑOZ, Alfonso. Sistema de reducción de lodos en tratamientos de aguas residuales. 2011. p. 15-17

²⁸ DEGREMONT. Water treatment Handbook. 1991.

²⁹ CRITES, Tchobanoglous. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá. 2004.

³⁰ AMADOR DÍAZ, Anisley., VELIZ, Eliet., BETALLER, Mayra. Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. Centro Nacional de Investigaciones Científicas. La Habana, Cuba. p. 2. 2014.

³¹ MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000). Título E. Bogotá, 2000. p. E9.

³² COLLAZOS, Carlos J. Tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2008. p. 45.

³³ DÍAZ, Amador., VELIZ, Eliet., BATALLER, Mayra. Tratamiento de lodos. Generalidades y aplicaciones. Revista CENIC. Vol. 46. 2015.

³⁴ AMADOR DÍAZ, Anisley., VELIZ, Eliet., BETALLER, Mayra. Op. Cit. p.3.

³⁵ CORTEZ, Elvira del Carmen. Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la región metropolitana. Santiago de Chile, 2003.

de ensayos, los cuales permiten evaluar y comparar los resultados con las cuantificaciones ya establecidas en la normatividad con el fin de establecer los posibles usos de los lodos, o los tratamientos previos a su disposición final.

- **Parámetros fisicoquímicos.**

- **pH:** una unidad de medida que indica el nivel de alcalinidad o acidez de una solución por medio de la determinación cuantitativa de iones de Hidrógeno que contiene una solución determinada. La escala de pH contiene una serie de números que varían de 0 a 14. Los inferiores a 7 y próximos a 0 indican acidez y los que son mayores de 7 y próximos a 14 indican basicidad, mientras que cuando el valor es 7 indica neutralidad³⁶. La medición de pH para materiales orgánicos, como los lodos, ordinariamente se realiza a través un instrumento de medición llamado potenciómetro, el cual consiste en la medición de la diferencia de potencial entre dos electrodos de los cuales uno de ellos es sensible a los iones hidrógeno y el otro es un electrodo de referencia³⁷. El pH influye en el proceso de compostaje, debido a su acción sobre los microorganismos, en general, las bacterias toleran pH entre 6 y 7.5³⁸.
- **Humedad:** es uno de los principales parámetros determinante en los lodos, Su valoración permite apreciar si el material está apto para implementarse en un sistema de compostaje, dichos valores deben estar comprendidos en un intervalo de 40-65% para facilitar el transporte de nutrientes y microorganismos³⁹. Un valor por debajo del rango establecido, indica la presencia de fases estacionarias, y en condiciones extremas, fase de muerte. Por el contrario, valores por encima del rango establecido, revela que el agua ocupa los espacios que pertenecen al aire, y de esta manera falte oxígeno y se produzca putrefacción y malos olores⁴⁰. El control de la humedad es un factor muy importante para un efectivo proceso de compostaje. El contenido de agua debe ser controlada para lograr una estabilización, inactivar patógenos y controlar olores⁴¹. La humedad se determina por método gravimétrico, descrito en la

³⁶ JARAMILLO, D. F. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2015. p. 361.

³⁷ NIZA, Helena., NOHAMA, Percy. Proposal of methodology and test protocol for evaluating and qualifying pH measuring devices. Brasil, 2016.

³⁸ CERISOLA, C.I. Lecciones de agricultura biológica. Ed. Mundi prensa. Madrid. 2012.

³⁹ LI, ZHENTONG, et al. Experimental and modeling approaches for food waste composting. Junio, 2013. vol. 93. p. 1247-1257

⁴⁰ EPSTEIN, Eliot. Industrial composting: environmental engineering and facilities management. CRC Preses, Taylor & Francis Group, LLC. 2011. p. 19.

⁴¹ BENEDICT, A. Composting municipal sludge: A technology evaluation, pollution technology review. Trad. JA Vigil. New Jersey, 1998. p.10-11.

NTC1495 (2013)⁴², que consiste en tomar una muestra de material, pesarla antes y después de su desecado (posterior al retiro de muestra de la mufla a 150 °C) y calcular su contenido de humedad, la muestra se considera seca cuando su peso permanece constante.

- **Cenizas:** medida que indica el porcentaje de la materia seca que permanece como materia orgánica tras el proceso de compostaje. Durante el compostaje la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada⁴³. Este declive de materia orgánica transcurre en dos etapas fundamentalmente, en la primera se produce un rápido descenso de los carbohidratos, transformándose las cadenas carbonadas largas en otras más cortas con la producción de compuestos simples; algunos de los cuales se reagrupan para formar moléculas complejas dando lugar a los compuestos húmicos. En la segunda etapa, una vez consumidos los compuestos transitorios, otros materiales más resistentes como las ligninas se van degradando lentamente y/o transformando en compuestos húmicos⁴⁴. La velocidad de transformación de materia orgánica depende de su naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y de las condiciones fisicoquímicas del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH)⁴⁵. Para realizarse un buen proceso de compostaje, el contenido de cenizas debe comprenderse entre 30 y 60%; valores inferiores al 30% normalmente indican que el compost está mezclado con arena, tierra, cenizas u otro compuesto mineral, y valores superiores al 60% indican que los residuos no están suficientemente compostados⁴⁶. El contenido de cenizas se determina por medio del método de calcinación de acuerdo con la NTC1886 (1983)⁴⁷, el cual consiste en calcinar la muestra seca empleada en la determinación de humedad, en una mufla a 550°C durante 3 horas, pesar la muestra antes de llevarla a la mufla a calcinación y una vez terminado el tiempo de calcinación, la muestra se lleva a un desecador hasta peso constante y se realiza la toma de pesos.

⁴² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar el contenido de agua (Humedad) de suelos y rocas, con base en la masa. NTC 1495. Bogotá D.C.: El instituto, 2013. p.6.

⁴³ ZUCCONI, F., DE BERTOLDI, M. Specifications for solid waste compost. 1987. P. 56-61.

⁴⁴ TOMATI, U., MADEJON, E., GALLI, E. Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Sci.* 2000. p. 108-115.

⁴⁵ MICHEL, F.C., PECCHIA, J.A., RIGOT, J. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci.* 2004. P.323-334.

⁴⁶ BUENO, P., DIAZ, M. Factores que afectan al proceso compostaje. 1ed. Madrid, España, 2008. p. 97.

⁴⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Determinación de humedad, cenizas y materia orgánica. NTC 1886. Bogotá D.C: el instituto, 1993. p.7.

- **Relación C/N:** la relación Carbono/Nitrógeno es el principal indicador a tener en cuenta para la realización de un compostaje, puesto que son elementos fundamentales en los procesos microbianos dentro del proceso de compostaje, el carbono se emplea para la energía y el crecimiento celular, mientras que el nitrógeno es empleado para la formación de células y síntesis de proteínas, además de ser esencial para brindar un crecimiento y desarrollo de los microorganismos⁴⁸. Los lodos son residuos ricos en Nitrógeno con relaciones C/N entre 5 y 11, y para obtener un compost de buena calidad, es importante que la relación C/N se encuentre entre 15 y 30⁴⁹, de ahí la necesidad de mezclar los lodos con materiales de enmienda, ricos en carbono, que permiten ajustar esta relación a los valores recomendados para garantizar la eficiencia del proceso, dentro de estos materiales se encuentran residuos como podas, viruta de madera, paja, cachaza de caña⁵⁰. Una relación C/N muy baja, no afecta el proceso de compostaje, perdiendo el exceso de nitrógeno en forma de amoníaco, por el contrario, si la relación es muy elevada, disminuye la actividad biológica⁵¹.

- **Conductividad eléctrica (CE):** la conductividad eléctrica es un parámetro que expresa mediante su medición, la concentración de sales solubles presentes en la solución de sustrato. La conductividad eléctrica de un compost está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso⁵². La CE tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de nutrientes⁵³. Ocurre a veces un descenso de la CE durante el proceso, lo que puede deberse a fenómenos de lixiviación en la masa, provocados por una humectación excesiva de la misma⁵⁴. Un exceso de salinidad en la solución del suelo dificulta la absorción de agua por las raíces de las plantas. El valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a

⁴⁸ PERDOMO, Sandra P. Seguimiento del proceso de humificación en compost inoculado. Bogotá, 2017. p. 19.

⁴⁹ KABBASHI, Nassereldeem. Sewage sludge composting simulation as carbon/nitrogen concentration change. En: Journal of environmental sciences. 2011. vol. 23, no. 11, p. 1928.

⁵⁰ TORRES, P., PÉREZ, A., ESCOBAR, J. C., URIBE, I. E. R, YIMERY. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Cali, 2007. 268

⁵¹ PANTOJA, MARTINEZ Y ROMÁN. Manual de compostaje del agricultor. Santiago de Chile. 2013. P. 31.

⁵² SANCHEZ, M.A., ROIG, A., BERNAL, M.P. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. Biores. Technol. 2001. p. 301-308.

⁵³ MÁRQUEZ, Pedro., BLANCO, Manuel Jesús., CABRERA, Francisco. Factores que afectan el proceso de compostaje. Huelva y Sevilla. 2008.p. 8.

⁵⁴ Ibid.

través del mismo, esto significa que, a mayor valor de conductividad eléctrica, mayor es la concentración de sales. Se recomienda que la CE de un sustrato sea baja, en lo posible menor a 1dS m⁻¹ (1+5 v/v), una CE baja facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad en el cultivo⁵⁵.

- **Parámetros microbiológicos.** Por otro lado, está la estimación de la calidad microbiológica del lodo. Se realiza para determinar los tipos de microorganismos presentes y su cuantificación. En la Norma Técnica Colombiana 5167: Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Se especifican las pruebas y la metodología para realizar las correspondientes determinaciones. Se requiere determinar: Microorganismos mesófilos aerobios, coliformes totales y fecales, mohos, levaduras, *salmonella sp*, *pseudomonas sp*, bacterias metanogénicas, *Clostridium sulfito reductor*, huevos helmintos.
- **Microorganismos mesófilos aerobios:** microorganismos que dependen del Oxígeno para sobrevivir, y cuyo rango de temperatura de crecimiento se encuentra entre los 15-45°C, siendo los 35°C, la temperatura apta de crecimiento⁵⁶. La intensa actividad metabólica de estos organismos, fundamentalmente hongos y bacterias, provocan la elevación de la temperatura en el interior de la masa en compostaje. Al aumentar la temperatura empiezan a proliferar bacterias y hongos termófilos que se desarrollan desde los 40°C hasta los 60°C. Estas especies empiezan a degradar la celulosa y parcialmente la lignina, con lo cual la temperatura sube hasta los 70°C⁵⁷, manteniéndose así, en una fase de actividad biológica lenta. Mientras la materia orgánica se ha consumido, la temperatura empieza a disminuir (el calor que se genera es menor que el que se pierde) y las bacterias y los hongos mesófilos reinvasan el interior del compost utilizando como fuente de energía la celulosa y la lignina residuales. Como consecuencia de las elevadas temperaturas alcanzadas durante el compostaje se destruyen las bacterias patógenas y parásitos presentes en los residuos de partida⁵⁸.
- **Coliformes totales y fecales:** grupo de especies bacterianas presentes en las aguas de tratamiento residuales, cuyas características bioquímicas indican que son bacilos gram negativos, aerobias o anaerobias facultativos. Son de importancia relevante como indicadores de contaminación en una muestra. Las

⁵⁵ BARBARO, Karlanian. Importancia del pH y la conductividad eléctrica en los sustratos para plantas. Argentina. 2014. p. 7.

⁵⁶ PRESCOTT, L., J. KLEIN, D. Microbiología. Cuarta edición. Mac Graw Hill. 1999. p.129.

⁵⁷ NEGRO, M., VILLA, F., AIBAR, J., ARACÓN, R., CIRIA, P., CRISTÓBAL, M. V., BENITO, A., GARCÍA MARTÍN, A., GARCÍA MURIEDAS, G., Labrador, C., LACASTA DUTOIT, Carlos., LEZAÚN, J. A., MECO, R., PARDO, Gabriel., SOLANO, M. L., TORNER, C., ZARAGOZA, C. Producción y gestión del compost. p.9.

⁵⁸ Ibid.

principales especies de bacterias coliformes son el *E. Coli* y *Enterobacter Aerogenes*, cuyo crecimiento se da en un intervalo de temperatura de 10 a 40 °C, y pH de 7 a 7,5, aunque son capaces de soportar temperaturas alrededor de los 45°C. Este microorganismo es relativamente termosensible y puede ser destruido con facilidad a temperaturas de pasteurización y también mediante la apropiada cocción de los alimentos⁵⁹.

- **Mohos:** los mohos son una especie de hongos multicelulares, filamentosos y heterótrofos, que se encuentran en sitios donde abunda la humedad y la luz es escasa, sin embargo, cuando se resecan, forman esporas y entran en un modo de resistencia, con lo cual logran sobrevivir en ambientes secos. Se alimentan de materia orgánica muerta o de parásitos vivos. Viven en condiciones entre 2 a 9 de pH, siendo favorable de 5,6. La mayoría de los mohos pueden considerarse mesófilos, es decir crecen a temperatura ambiente, cuya temperatura idónea para la mayoría de ellos es de unos 25 a 30°C, pero algunos crecen bien a 35-37°C. (Ramírez, 2010).
- **Levaduras:** las levaduras son hongos, cuyas dimensiones pueden oscilar de 1 a 9 µm de ancho y 2 a más de 20 µm de longitud según la especie, nutrición, edad y otros factores⁶⁰. Las levaduras son moderadamente resistentes al calor y a la desecación, por lo que mantienen la viabilidad de la especie durante los cambios adversos del medio ambiente, aunque la mayor parte de estas, crecen en medios donde hay abundante agua, sobre todo en presencia de altas concentraciones de solutos, como azúcar o sal. El crecimiento de la mayoría de las levaduras se ve favorecido por un pH ácido próximo a 4 – 4,5 y no se desarrollan bien en medio alcalino a menos que se hayan adaptado al mismo. Las levaduras crecen mejor en condiciones aerobias, aunque si bien las fermentativas pueden hacerlo, aunque lentamente, en condiciones anaeróbicas⁶¹.
- ***Clostridium sulfito reductor:*** bacterias de morfología bacilo gram positiva, anaerobias estrictas, capaces de formar esporas y con capacidad de reducir el sulfito a sulfuro. Son colonizadores habituales del intestino humano y de algunos animales. Sus esporas son altamente resistentes al calor, lo que le da un valor como indicadores de contaminación fecal. A pesar de ser bacterias anaerobias obligadas, no todos tienen la misma sensibilidad al oxígeno. Crecen a

⁵⁹ RAMÍREZ ARISTIZÁBAL, Luz Stella. Manual de Microbiología. Universidad Tecnológica de Pereira. 2010.

⁶⁰ MJ, Carlile. et al. The Fungi. 2ª ed. Academic Press, San Diego, 2011. p 70.

⁶¹ ARIAS, Cristian Mauricio., MARULANDA, Jackeline. Estandarización y aplicación de un método espectrofluorométrico para la identificación de inhibidores de proteasa aspartica secretada de *Candida albicans* a partir de extractos de plantas de la familia Melastomataceae y Rubiaceae Universidad Tecnológica de Pereira. 2010.

temperatura de 37 °C y a un pH entre 7 y 7,4, de modo que son fácilmente inactivas a pH ácido o básico⁶².

- ***Salmonella sp***: la salmonella es un microorganismo de género bacteriano, constituido por bacilos gram negativos intracelulares anaerobios facultativos, mesófilas, con una temperatura apta de crecimiento de 35 – 37 °C y un rango de 5 - 46 °C. Este grupo de patógenos se adapta con facilidad en los animales y humanos. Son capaces de multiplicarse en cualquier producto fresco a una velocidad muy elevada y puede duplicar su número cada 15 o 20 minutos si la temperatura es superior a 20°C. Sin embargo, los extremos no le favorecen, el frío ralentiza su crecimiento, la congelación lo detiene y el calor a partir de 70° C la destruye⁶³.
- ***Pseudomonas sp***: microorganismo perteneciente al grupo bacilo gram negativo, aeróbico que son propensos a la descomposición de materia orgánica biodegradable⁶⁴. Es un patógeno oportunista en humanos y también en plantas. Las cepas de este género, son capaces de procesar, integrar y reaccionar a una amplia variedad de condiciones cambiantes en el medio ambiente y muestran una alta capacidad de reacción a señales fisicoquímicas y biológicas. Existen cepas capaces de adquirir resistencia a los metales pesados, disolventes orgánicos y detergentes, lo cual les permite explotar una amplia gama de fuentes de carbono como nutrientes⁶⁵.

1.1.4 Tratamiento de lodos. De acuerdo con su naturaleza, los lodos deben ser tratados antes de su disposición final. Deben ser estabilizados para reducir los malos olores y los riesgos a la salud; y conviene ser desaguados para reducir su volumen. Existen cinco procesos para el tratamiento de lodos residuales, los cuales se observan en la figura 1.

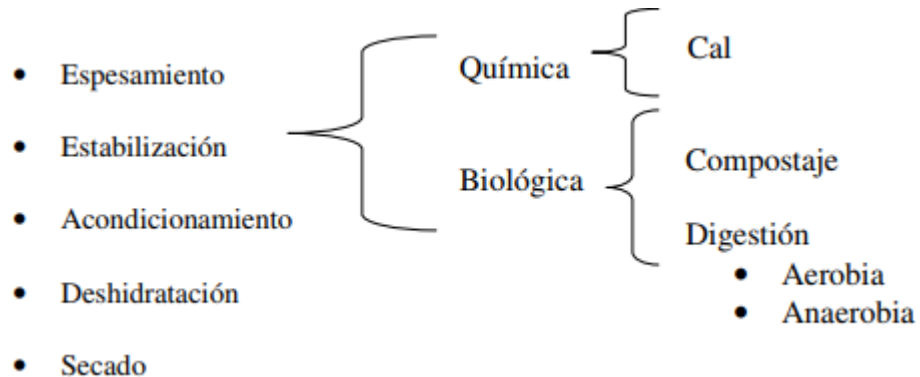
⁶² THE INTERNATIONAL COMMISSION ON MICROBIOLOGICAL SPECIFICATIONS FOR FOODS ICMSF. Procedimiento técnico para el aislamiento y recuento de formas esporuladas de *Clostridium sulfito reductor* en muestras de alimentos de consumo humano. 2016. 2 p.

⁶³ RAY B. Fundamental food microbiology. Boca ratón. 2004. 22 p.

⁶⁴ MALDONADO, ARACELY., LÓPEZ, LUCERO., LORES C, LUCILA., OSORIO H, EDUARDO. Identificación morfológica de hongos y bacterias en lodos de extracción de gas natural y de tratamiento de aguas residuales. Temas de Ciencia y Tecnología.2017. P.4.

⁶⁵ WILLEY J, SHERWOOD L, WOOLVERTON CJ. Prescott's Microbiology. 2013.

Figura 1. Técnicas de tratamiento de lodos residuales.



Fuente. Digestión anaerobia de lodos residuales usando un reactor de manto de lodos no convencional (Tipo UASB). Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/620/62011384001.pdf>.

- **Espesamiento.** Este proceso se realiza con el fin de reducir el volumen del lodo a manipular, aumentando la concentración de los sólidos. El espesado se lleva a cabo mediante procedimientos físicos que incluyen la flotación, el espesado por gravedad y la centrifugación⁶⁶. Si los lodos se van a estabilizar por digestión anaerobia, su espesamiento no debe pasar del 7% en sólidos totales (70 g/L), considerándose como conveniente, una concentración entre el 3 y el 6%, con objeto de no afectar las propiedades reológicas del lodo y sus consecuencias en bombas, tuberías y mezcladores⁶⁷.
- **Estabilización.** Proceso que comprende los tratamientos destinados a controlar la degradación biológica, la atracción de vectores y la patogenicidad de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales acondicionándolos para su uso o disposición final⁶⁸. Las técnicas de estabilización de lodos más recurridas son: La digestión aerobia, digestión anaerobia, estabilización con cal, tratamiento térmico y compostaje⁶⁹.
- **Digestión anaerobia.** La digestión aerobia es un proceso donde se propicia la degradación de la materia orgánica contenida en el material en ausencia de oxígeno. Allí, la materia orgánica se convierte en Metano y Dióxido de Carbono principalmente. El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado

⁶⁶ WINKLER M. Tratamiento biológico de aguas de desecho. México. 1994.

⁶⁷ NOYOLA ROBLES, A. Digestión anaerobia de lodos. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. México. p.10.

⁶⁸ MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287. Criterios para el uso de los biosólidos generados en planta de tratamiento de aguas residuales. 2014.

⁶⁹ OROPEZA GARCÍA, Norma. Lodos residuales: estabilización y manejo. Chetumal, Quintana Roo, México. 2006. p.64.

durante periodos de tiempo considerables. Este proceso suele tener lugar en intervalos mesofílico (35°C) y termofílico (55°C) de temperatura⁷⁰.

- **Digestión aerobia.** Este proceso de estabilización de los lodos, se da en presencia de Oxígeno, para la producción de microorganismos aerobios. Los métodos cada vez menos usados de digestión aerobia psicrófila y mesófila operan a temperaturas en torno a los 20 °C y presentan tiempos de residencia entre 10 y 30 días⁷¹. El tiempo de residencia viene condicionado principalmente por el origen de los lodos, correspondiendo los tiempos más reducidos a la digestión aerobia de biosólidos procedentes únicamente de un proceso de lodos activos.⁷²
- **Tratamiento químico.** Este tipo de tratamiento, consiste en agregar dosis suficientes de cal (alrededor de 0,3 kg Cal /kg ST) a los lodos residuales para elevar su pH por encima de 12⁷³. La reacción de la cal con el agua del lodo es exotérmica, por lo tanto, la temperatura se incrementa, alcanzando valores superiores a 50 °C. El efecto combinado de un entorno fuertemente alcalino, además del efecto de pasteurización debido a la temperatura, hace desfavorable la actividad biológica de los microorganismos, reduciendo sustancialmente el número de organismos patógenos, como consecuencia de ello, el lodo no se descompone, tiene olor a amoníaco y no provoca riesgos para la salud pública. Sin embargo, estas condiciones se mantendrán si el pH no desciende del valor de 11, por lo menos 2 horas después del tratamiento⁷⁴.
- **Incineración.** Proceso de estabilización que consiste en la combustión de la materia orgánica de los lodos a 800 °C aproximadamente⁷⁵. Se ha utilizado para estimar la calidad de los lodos residuales como combustible y la recuperación de energía que se desperdicia dentro de este proceso, y ofrece las ventajas potenciales de reducción de volumen y desintoxicación⁷⁶. La incineración de

⁷⁰ NOYOLA ROBLES, A. Op. Cit, p.10.

⁷¹ HAMMEKEN ARANA, A. M., ROMERO GARCÍA, E. Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula. Universidad de las Américas Puebla. Mayo, 2005.

⁷² HAUBRY, A., BONNIN, C. Y PRÉVOT, C. Aerobic and Anaerobic Sludge Treatment Disinfection Techniques. Sludge 2000 Conference, Paper 8, Cambridge. 1992.

⁷³ TORRES, Patricia., MADERA, Carlos., SILVA, Jorge. Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Envigado. 2009

⁷⁴ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503. Office of water/ Office science and technology sludge. Washington. p. 173

⁷⁵ SILVA, DP., RUDOLPH, V., TARANTO, OP. El secado de los lodos de aguas residuales por inmersión en fritura. Braz. J. Chem. Ing. 2005, vol.22, p.271-276.

⁷⁶ ZANONI, A. E., MUELLER, DL. Calorific Value of Wastewater Plant Sludges. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 1982. p.187-195.

lodos de aguas residuales requiere que el contenido de sólidos se eleve a aproximadamente 33% para que el lodo sea autotérmico⁷⁷.

1.1.5 Compostaje. Consiste en la transformación de la materia orgánica en abono, mediante un proceso biológico exotérmico, realizado por la actividad secuencial de una diversidad de microorganismos descomponedores que comen, degradan y digieren las células y las moléculas que componen la materia orgánica⁷⁸. Éstos requieren de ciertas condiciones ambientales controladas que faciliten el incremento de la temperatura (usualmente entre 55 - 60 °C)⁷⁹ para la destrucción de patógenos y para garantizar un producto con pH entre 6,5 y 8 unidades que favorezca el crecimiento de las plantas, reduzca la movilidad de metales pesados y pueda ser usado benéficamente como acondicionador de suelos⁸⁰.

En todo proceso de compostaje, se pueden diferenciar por lo menos dos fases, la fase de descomposición y la fase de maduración.

- **Fase de descomposición.** Fase activa del proceso de compostaje en la que se simplifican las moléculas complejas en moléculas orgánicas e inorgánicas más sencillas. Es un proceso exotérmico, debido principalmente a la actividad biológica donde los microorganismos consumen oxígeno y se alimentan de la materia orgánica de los componentes presentes en el compostaje; emitiendo a la atmósfera calor, dióxido de carbono, vapor de agua, metano, entre otros compuestos⁸¹.
- **Fase de maduración.** Fase que se presenta cuando la temperatura del compostaje baja a menos de 40 °C hasta presentar valores cercanos a la temperatura ambiente. Durante esta fase ocurre un proceso de humificación de la materia orgánica, produciéndose una composta madura con características

⁷⁷ FURNESS, D.T., HOGGET, L.A., JUDD, S.J. Thermochemical Treatment of Sewage Sludge. Journal of the Chartered Institution of Water Environment and Management, February, 2000. vol.14, p.57-65.

⁷⁸ ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ECOLOGÍA TERRESTRE. La descomposición de la materia orgánica en humedales: La importancia del componente microbiano. 2005. p.21.

⁷⁹ KIEFL V G. Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. McGraw Hill, 1999. p. 331.

⁸⁰ KUTER, G., BLACKWOOD, K., L.F. DÍAZ, J., DONOVAN, D., DURFEE, E., EPSTEIN, J., HAY, M., LANG, T., RICHARD, C., SAVAGE, P., STRATTON, P., TADBY, T., WALSH, C., WILBER III., WILLIAMS, T. Biosolids Composting. Water Environment Federation, Washington, 1995. p. 187.

⁸¹ GÓMEZ, R.S., ÁNGELES, M.L., NUÑEZ, G., FIGUEROS, U. Metodologías para la elaboración de compostas y lombricompostas de excretas de ganado de leche. Centro nacional de investigación disciplinaria en fisiología y mejoramiento animal. p. 19.

húmicas, con esto se considera al material biológicamente estable y se da por terminado el proceso⁸².

1.1.6 Tipos de Compostaje.

- **Compostaje aerobio.** Proceso biológico aeróbico que se caracteriza por el predominio de los metabolismos respiratorios aerobios, y por la alternancia de etapas mesotérmicas (20- 40 °C) con etapas termogénicas (40- 75°C) y la participación de microorganismos aerobios mesófilos y termófilos respectivamente⁸³. Ese tipo de compostaje comprende cuatro etapas: etapa de latencia, mesófila 1, termófila y mesófila 2 (de enfriamiento)⁸⁴.
- **Fase de latencia.** Etapa inicial del proceso de biodegradación, ocurre desde el momento en que se realiza el montaje el compost hasta que se empieza a notar una elevación de temperatura⁸⁵. Para que esta etapa de inicio, se deben fijar en los valores adecuados los parámetros de relación carbono / nitrógeno, temperatura, humedad, pH, concentración de oxígeno, cantidad de biomasa, carga microbiana. Su tiempo de duración es aproximadamente de 72 horas, si se tienen inicialmente los parámetros dentro de los valores apropiados⁸⁶.
- **Fase mesofílica o mesotérmica 1.** Etapa que ocurre generalmente entre los 20 y 40 °C, donde se produce el desarrollo de la flora mesofílica, predominando las bacterias, levaduras, mohos y actinomicetos mesófilos⁸⁷. En esta fase, toma lugar la descomposición de los azúcares, el almidón, las proteínas y las grasas, lo que libera una cuantiosa energía y conlleva a que se multipliquen rápidamente los microorganismos, se eleve la temperatura en el interior del sistema y disminuya el pH a valores de alrededor de 5,5 en corto tiempo (24 a 72 horas)⁸⁸.

⁸² SAÑA, J., SOLIVA, M., El compostatge: procés, sistemes i aplicacions. Servei del medi ambient de la diputació de Barcelona. p.98.

⁸³ ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). Manual para la Elaboración de Compost Bases Conceptuales y Procedimientos. 1999. p. 69.

⁸⁴ SOTO, Gabriela. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Taller de Abonos Orgánicos. En: Abonos Orgánicos, el proceso del compostaje. Costa Rica, 3 y 4 marzo, 2003. p.18.

⁸⁵ RAMIREZ, Jorge Fernando., CARMONA, Daniel E. Análisis e implementación de un proceso de compostaje para la valorización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual industrial. Universidad católica de Manizales. 2016. p. 17.

⁸⁶ SZTERN, D., PRAVIA, M. Manual para la elaboración del compost bases conceptuales y procedimientos. Uruguay, 1999.

⁸⁷ RIDDECH, N., KAMMER, S., INSAM. Characterization of microbial communities during composting of organic wastes. Microbiology of composting. 2002. p. 43-52

⁸⁸ SALAZAR ARCE, Takeshi. Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos. Revista de investigación universitaria. Universidad peruana Unión. Lima, 2014. p. 78.

- **Fase termofílica o termogénica.** En esta fase predomina la microflora (actinomicetos y bacilos) termófila debido a los cambios en la temperatura, ésta puede incrementarse desde los 40° hasta los 70°C, provocando la eliminación de agentes patógenos, hongos, esporas y todos los elementos biológicos no deseados⁸⁹. De las características más importantes de esta etapa, se puede destacar la generación de vapor de agua y dióxido de carbono, elementos que tienen importancia al ser letales para el crecimiento de larvas dentro del material, por esto, la ampliación de esta etapa beneficia la higienización presentada en el compost⁹⁰. Al comenzar el desenlace de esta etapa, el agotamiento de nutrientes genera una disminución notoria en la temperatura y por ende la pérdida de microorganismos termófilos⁹¹.

- **Fase mesofílica 2 (de enfriamiento).** Etapa en la que la temperatura desciende hasta valores próximos a la de la temperatura ambiente y se produce una recolonización de microorganismos mesófilos, que permanecieron inactivos durante la fase anterior y que resistieron las altas temperaturas⁹². Se produce la estabilización progresiva del compost⁹³ en la cual estos microorganismos mesófilos comienzan a degradar los elementos más resistentes como la celulosa y la lignina y compuestos orgánicos tóxicos. Ocurre la oxidación y mineralización del nitrógeno inorgánico y los compuestos azufrados, la formación de compuestos del humus, la fijación del nitrógeno atmosférico, la supresión de fitopatógenos, la mineralización del hierro, manganeso y fósforo, la formación de agregados minerales y la disminución de la cantidad de metales pesados a través de la formación de sales insolubles⁹⁴. La duración de esta fase también depende de la composición inicial del compost, del control de la temperatura y humedad que se haya tenido durante la etapa termofílica y de las condiciones ambientales que prevalecen durante la maduración del sistema de compostaje⁹⁵. En la figura 2 se observan las fases del proceso de compostaje con los microorganismos que intervienen en cada una, la evolución de la temperatura, pH y relación C/N.

⁸⁹ ROMERO, Lucía., SAUCEDO, María del Rosario., VIRAMONTES, Uriel., VILLALOBOS, Jesús A. Fases del proceso de compostaje y dinámica de temperaturas en mezclas de estiércol bovino y rastrojo de maíz. Durango, México, 2015. p. 3.

⁹⁰ RIVERO DE TRINCA, Carmen. Materia orgánica del suelo. 2018. p. 128-142.

⁹¹ WONG LOPEZ, Wendy. Estudio del uso de residuos industriales no peligrosos a través del proceso de compostaje y su aplicación para el cultivo de maíz y frijol. Tlaxcala, México, Junio 2010. p.23.

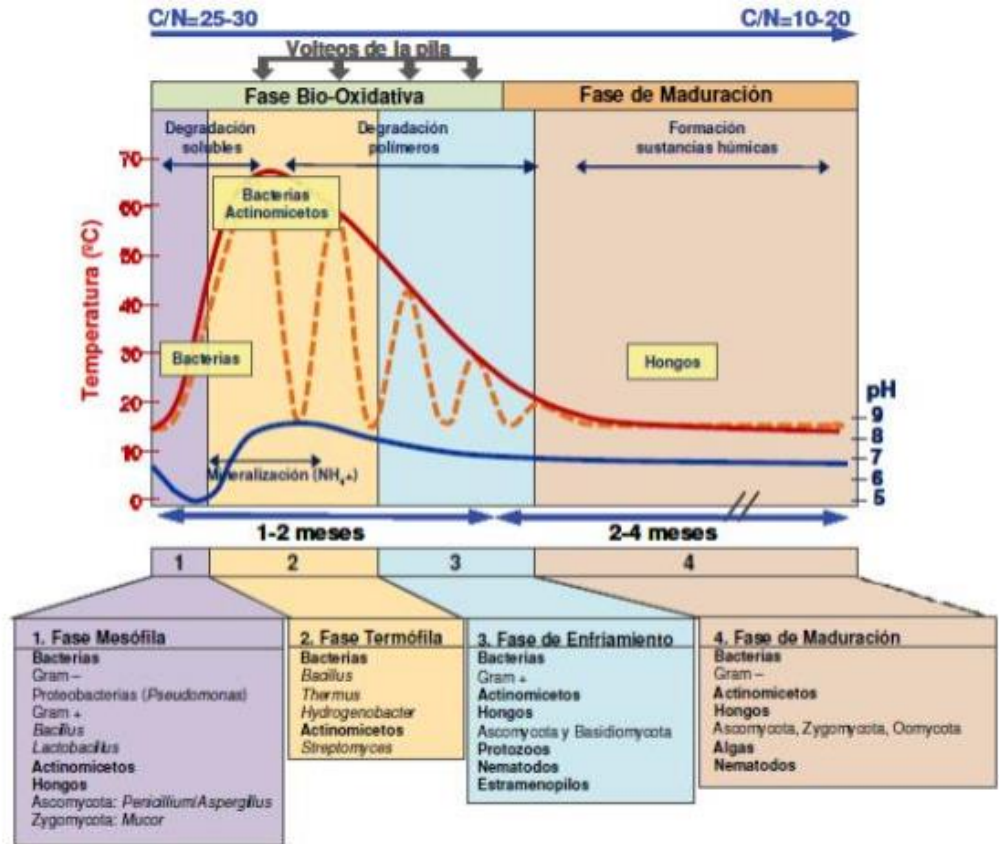
⁹² SUÁREZ BORDÓN, Sebastián. El proceso del compostaje. Granja agrícola experimental. p.91.

⁹³ LEAL, Walter., NOYOLA, Ricardo., MILÁN, Pedro., VARGAS RUIZ, Valeria. Sustainable development research and practice in Mexico and selected Latin American countries. p. 69.

⁹⁴ LAICH, Federico. El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. Unidad de Microbiología Aplicada. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. p. 5.

⁹⁵ GÓMEZ, R.S., ÁNGELES, M.L., NUÑEZ, G., FIGUEROA, U. Metodologías para la elaboración de compostas y lombricompostas de excretas de ganado de leche. Centro nacional de investigación disciplinaria en filosofía y mejoramiento animal. p. 19.

Figura 2. Evolución del proceso de compostaje.



Fuente. Vermicompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal. Disponible en <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8685/tesisUPV3395.pdf>.

- **Compostaje anaerobio.** Proceso de compostaje en el que se descompone la materia orgánica sin presencia de Oxígeno por medio de microorganismos anaerobios. El producto obtenido después del proceso generalmente está constituido por metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y lodos. Los lodos pueden ser empleados como fertilizante debido a su capacidad de mejorar los suelos⁹⁶.

⁹⁶ KIELY, Gerard. Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. España. McGraw Hill, 1993. V3. p. 55.

1.1.7 Sistemas de Compostaje.

- **Sistema Abierto.** Estos sistemas de compostaje, como su nombre lo indica, se encuentran al aire libre, se caracterizan por ser simples, al no necesitar de estructuras ni materiales complejos, su manejo e instalación es sencillo y requiere de un menor costo de inversión y construcción comparado con los sistemas cerrados. Hacen parte de este sistema, las pilas, que pueden ser estáticas o con movimiento mediante una técnica de volteo manual o mecanizada⁹⁷.
- **Pilas estáticas.** Este sistema es relativamente simple, el más económico y el más utilizado. Consta de realizar hileras del material orgánico a compostar, que pueden ser extensas o no, dependiendo de la técnica de aireación a emplear. Las medidas de éstas pilas, oscilan entre 1,2 a 2 metros de altura, por 2 a 4 metros de ancho, siendo la longitud variable⁹⁸. La aireación de estos sistemas se efectúa de dos formas: por convección natural (aireación pasiva) o por aireación forzada, esta última se consigue por tres métodos: succión, insuflado y alternada (succión e insuflado)⁹⁹. Las pilas estáticas por aireación natural, constan de tuberías que deben atravesarla y permitir que el aire caliente que sube desde el centro de la pila cree un vacío parcial que aspire el aire de los lados¹⁰⁰, La altura recomendada de la pila es de 1 a 1,5 metros, aunque la forma y tamaño oportuno de la pila depende del tamaño de partículas, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición, todo lo cual afecta el movimiento del aire hacia el centro de la pila¹⁰¹. Por otro lado, las pilas que funcionan con aireación forzada, constan de sistemas que suministran aire a presión o succionan aire mediante maquinaria especializada, para ello, se utilizan compresores para inyectar aire al interior o aspiradores que succionan aire hacia el exterior¹⁰². Este sistema de compostaje requiere una serie de equipamiento (compresor, red de tuberías, válvulas y sistemas de control de presión de aire, temperatura y humedad). El aporte de oxígeno puede realizarse de forma continua, a intervalos o ligados a un termostato que, llegada una determinada temperatura (aprox. 60°C) acciona el mecanismo de inyección de aire hasta que la temperatura desciende hasta el valor deseado¹⁰³. Una vez que se constituye la pila, no se

⁹⁷ TORTOSA, Germán. Sistemas de compostaje. 2015.

⁹⁸ CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). Técnicas de compostaje. Colombia. Recupera de: [Consultado el 20 de Julio del 2018].

⁹⁹ HAUG, R.T. The practical Handbook of compost engineering. Lewis publishers. Boca Raton. Florida. 1993.

¹⁰⁰ ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Composting Yard Trimmings and Municipal Solid Waste. 1994. [En línea]. [Consulta: 24 Julio 2018]

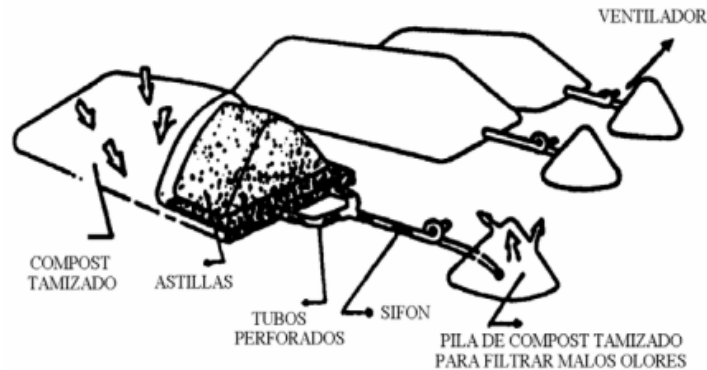
¹⁰¹ Ibid.

¹⁰² ENERGY GREEN GROUP. Túneles de aireación forzada. Biocompostajes españoles. 2018.

¹⁰³ CALCINA, Marleny. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para la producción de abono orgánico en el distrito de Asillo. Universidad privada San Carlos. Perú. 2015. p.26.

toca, en general, hasta que la etapa activa de compostaje sea completa. En estas pilas, el proceso puede tener un tiempo de duración entre 60 y 120 días¹⁰⁴. En la figura 3, se observa la estructura de una pila estática con aireación forzada.

Figura 3. Estructura de pila estática con aireación forzada.



Fuente. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. Disponible en [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgict55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1463411](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgict55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1463411).

- **Pilas con volteo.** Este sistema es uno de los más utilizados en la industria de compostaje. La Preparación de la mezcla puede hacerse de forma manual o mecánica, se confecciona en capas o mezclando los materiales en determinadas proporciones. El término de volteo es asociado con la aireación del sistema por medio de la destrucción y reconstrucción de la pila con una frecuencia determinada, en forma regular, cada 6 a 10 días para que la aireación sea adecuada¹⁰⁵. El volteo, además de promover la aireación de la pila, también permite la homogenización de todo el material que está siendo compostado. Hay varios factores que afectan el proceso del volteo, como lo son el área disponible y la cantidad de material que se está compostando, al igual que lo es la cantidad de humedad que contenga el material y la temperatura de la misma. Un exceso de aireación provocará una muy baja humedad y la disipación del calor generado por parte de los microorganismos, evitando así la sanidad del material. Si bien, junto a la pila estática, siendo estos los procesos más económicos, pueden tener

¹⁰⁴ ARIAS ISAZA, G.C., PÉREZ MÉNDEZ, M.A., LAINES CANEPA, J.R., CASTAÑÓN NÁJERA., G. Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica. 2009.

¹⁰⁵ SOLANO. Estructura para la construcción de pilas estáticas con aireación pasiva, 2001.

problemas sanitarios y de plagas debidos a que las pilas son de un considerable tamaño y se encuentran al aire libre¹⁰⁶.

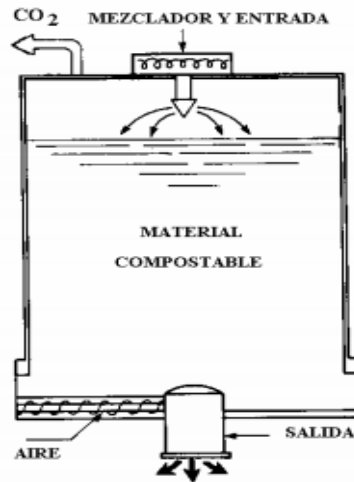
- **Sistema Cerrado.** Los sistemas de compostaje cerrados se encuentran aislados del ambiente, lo que permite un mayor control de las condiciones del proceso y de las emisiones, así como un menor tiempo de residencia (generalmente pueden acelerar la fase de degradación de al menos 7 a 15 días), dependiendo del tipo de sustrato empleado. Se caracterizan por llevar a cabo el compostaje en reactores cerrados, su principal división se da entre reactores de flujo horizontal y vertical. Los reactores de flujo vertical suelen tener alturas superiores a los 4 metros y pueden ser continuos o discontinuos. Los reactores discontinuos comprenden alturas de 2-3 m con un sistema de aireación forzada o volteo hacia pisos inferiores. Los reactores de flujo horizontal se dividen entre aquellos que poseen un sistema de movimiento rotatorio, y los que permanecen estáticos. El principal inconveniente que generan estos, es elevado costo de inversión de las instalaciones¹⁰⁷.
- **Reactores verticales.** Los reactores verticales son tanques cilíndricos cerrados que se encuentran aislados térmicamente y pueden operar de forma continua o discontinua. Este tipo de reactores maneja un sistema de aireación y extracción de material, procesos que residen en la parte inferior del reactor. En la parte inferior del reactor, se introduce el material mediante un tornillo alimentador. En los sistemas cerrados continuos se utilizan reactores de 4-10 metros de altura, con un volumen total de 1000 a 3000 metros cúbicos¹⁰⁸. A medida que se va extrayendo el material compostado, el material fresco va descendiendo. El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (éstos son aspirados por la parte superior del reactor). El tiempo de residencia es de 2 semanas. Este sistema de compostaje conlleva a un costo elevado de inversión y operación. En la figura 4 se muestra la estructura de un reactor tipo vertical con mezclador.

¹⁰⁶ R. Tomás. Elaboración de una pila de compost con restos vegetales por el sistema vegetal. Instituto canario de investigaciones agrarias. Tenerife. 2006.

¹⁰⁷ MORENO, J., MORAL, R., GRACIA MORALES, J.L., PASCUAL, J.A., BERNAL, M.P. Residuo a recurso: El camino hacia la sostenibilidad. Aspectos biológicos de la estabilización aeróbica. 2015. p.203.

¹⁰⁸ SAÑA, J.; SOLIVIA M. El compostaje: Proceso, sistemas y aplicaciones. Barcelona. 1998. p.20.

Figura 4. Estructura de reactor tanque vertical.



Fuente. El compostaje: Proceso, sistemas y aplicaciones. Disponible en <https://www.slideshare.net/IvanRodriguez213/2000-compost-ciemat>.

- **Reactores horizontales.** Estos reactores consisten de un cilindro horizontal que suele tener de dos a tres metros de diámetro, pueden ser estáticos o con movimiento. Estos últimos pueden ser cargados y tener un sistema de mezclado por volteo, o con un mezclador interno que generalmente gira a una velocidad de 2 rpm a lo largo de su eje longitudinal¹⁰⁹. El material preseleccionado se somete a un proceso de fermentación que tiene lugar en un tambor que puede trabajar en continuo o por cargas durante 15 a 30 días en condiciones estáticas o de volteo periódico, el cual consiste de un tratamiento mecánico continuo, en el que se presenta una fase de preparación del sustrato fisicoquímico, para después de este, por medio de pilas o en el reactor, obtener el compostaje¹¹⁰. La principal ventaja del sistema de reactor con movimiento es que consigue un cierto grado de mezcla y homogeniza los residuos, lo que se traduce en menor tiempo de fermentación comparado con otros tipos de reactores. El principal inconveniente de estos sistemas es el costo de inversión y de operación de las instalaciones¹¹¹.

¹⁰⁹ CAMPOS, Elena., ELÍAS, Xavier., FLOTATS, Xavier. Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje. Tratamiento y valorización energética de residuos. 2012. p. 678.

¹¹⁰ STENTIFORD, E. Composting control: principles and practice. In: de Bertoldi, M. En M. de Bertoldi, The Science of Composting. Part I. 1996. p. 49.

¹¹¹ NEGRO, M., VILLA, F., AIBAR, J., ARACÓN, R., CIRIA, P., CRISTÓBAL, M. V., BENITO, A., GARCÍA MARTÍN, A., GARCIA MURIEDAS, G., Labrador, C., LACASTA DUTOIT,

1.1.8 Abonos Orgánicos. Los abonos orgánicos son productos debidamente compostados y estabilizados que al ser aplicados al suelo, activan principalmente los procesos microbiales, fomentando simultáneamente su estructura, aireación, capacidad de retención de humedad, aumento de pH¹¹² y aportando pequeñas cantidades de nutrientes. Incluye subproductos animales, estiércoles, residuos vegetales y lombricompostos¹¹³. Los abonos orgánicos tienen altos contenidos de nitrógeno mineral y cantidades significativas de otros elementos nutritivos para las plantas,¹¹⁴ como potasio¹¹⁵, calcio y magnesio¹¹⁶. En cuanto a las propiedades físicas, mejoran la infiltración de agua, la estructura del suelo y la conductividad hidráulica; disminuyen la densidad aparente y la tasa de evaporación, así como promueven un mejor estado fitosanitario de las plantas¹¹⁷.

1.1.9 Fertilizantes Orgánicos Sólidos. Producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos separados en la fuente o mezcla de los anteriores, que contienen porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican en la NTC5167¹¹⁸.

1.1.10 Fertilizantes Orgánico-minerales Sólidos. Producto sólido de origen animal, vegetal o proveniente de lodos de tratamiento de aguas residuales domésticas o agroindustriales estabilizados o de origen pedogenético; con o sin mezcla de abonos minerales, que contienen porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican en la NTC5167. (NTC 5167).

Carlos., LEZAÚN, J. A., MECO, R., PARDO, Gabriel., SOLANO, M. L., TORNER, C., ZARAGOZA, C. Producción y gestión del compost. Op. Cit.p.15

¹¹² OUÉDRAOGO, E.; MANDO, A. Y ZOMBRE, N. P. Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2001, vol. 84, no. 3, p. 259-266.

¹¹³ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaquetado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación y

¹¹⁴ CEGARRA, J. A., ROIG, A. F., NAVARRO, M. P., BERNAL, M., ABAD, M., CLIMENT. D., ARAGÓN, P. Características, compostaje y uso agrícola de residuos sólidos urbanos. En: Memorias Jornadas de Recogidas Selectivas en Origen y Reciclaje. Córdoba, España: Ed Mundi – Prens.1993. p. 46-55.

¹¹⁵ . ERHART, E., HARTL, W. Mulching with compost improves growth of blue spruce in Christmas tree plantations. European Journal of Soil Biology, 2003, vol. 39, no. 3, p. 149-156. I

¹¹⁶ JAKOBSEN, S. T. Leaching of nutrients from pots with and without applied compost. Resour. Conserv. Recyc., 1996, vol.18, p. 1-11.

¹¹⁷ B, Andrea. Manejo ecológico del suelo. Dominicana. Editorial RAPAL. 2004. p. 27.

¹¹⁸ ICONTEC. Norma técnica colombiana NTC 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Bogotá, 2011.

1.2 MARCO LEGAL

1.2.1 Normatividad de biosólidos y fertilizantes. En la tabla 1 se describen los objetivos de la normatividad legal vigente en cuanto al manejo y disposición de biosólidos y el control legal y técnico de los fertilizantes.

Tabla 1. Normatividad del manejo y disposición de biosólidos y requisitos de los fertilizantes.

Norma	Objeto
Norma técnica colombiana NTC 5167 de 2011	Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelo ¹¹⁹ .
Decreto 1287 de 2014	El presente decreto tiene por objeto establecer los criterios para el uso de los Biosólidos producidos a partir de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales ¹²⁰ .
Norma técnica colombiana NTC 5667 de 2013	La presente norma presenta una guía para el muestreo de lodos de instalaciones de tratamiento de aguas residuales, de tratamiento de aguas y procesos industriales. Se aplica a todos los tipos de lodos que surgen de estas obras y también a lodos de características similares. También se brinda orientación sobre el diseño de programas de muestreo y técnicas para la recolección de muestras ¹²¹ .
Resolución 00150-2003	Tiene como objetivo, 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 ¹²² .
Ley 9 de 1979	Establecer los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del ambiente ¹²³ .

¹¹⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167. Op. Cit.

¹²⁰ MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287. Colombia. 2014.

¹²¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 5667. Colombia. 2004.

¹²² INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Resolución 00150. Colombia. 2003.

¹²³ CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1979. Título I: de la protección del medioambiente. Colombia.

Tabla 1. (Continuación)

Norma	Objeto
RAS-I Título I	Se establecen buenas prácticas para el manejo de lodos ¹²⁴ .
Ley 1252 de 2008	Por la cual se dictan normas prohibitivas en material ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones ¹²⁵ .
Decreto 4741 de 2005	Reglamenta la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos ¹²⁶ .
Resolución 631 de 2015	Tratamiento y disposición de residuos ¹²⁷ .

Fuente. Elaboración propia, basado en recolección bibliográfica.

¹²⁴ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741. Colombia. 2005.

¹²⁵ REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. RAS: Título I. 2000.

¹²⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Ley 1252. Colombia. 2008.

¹²⁷ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631. Colombia. 2015.

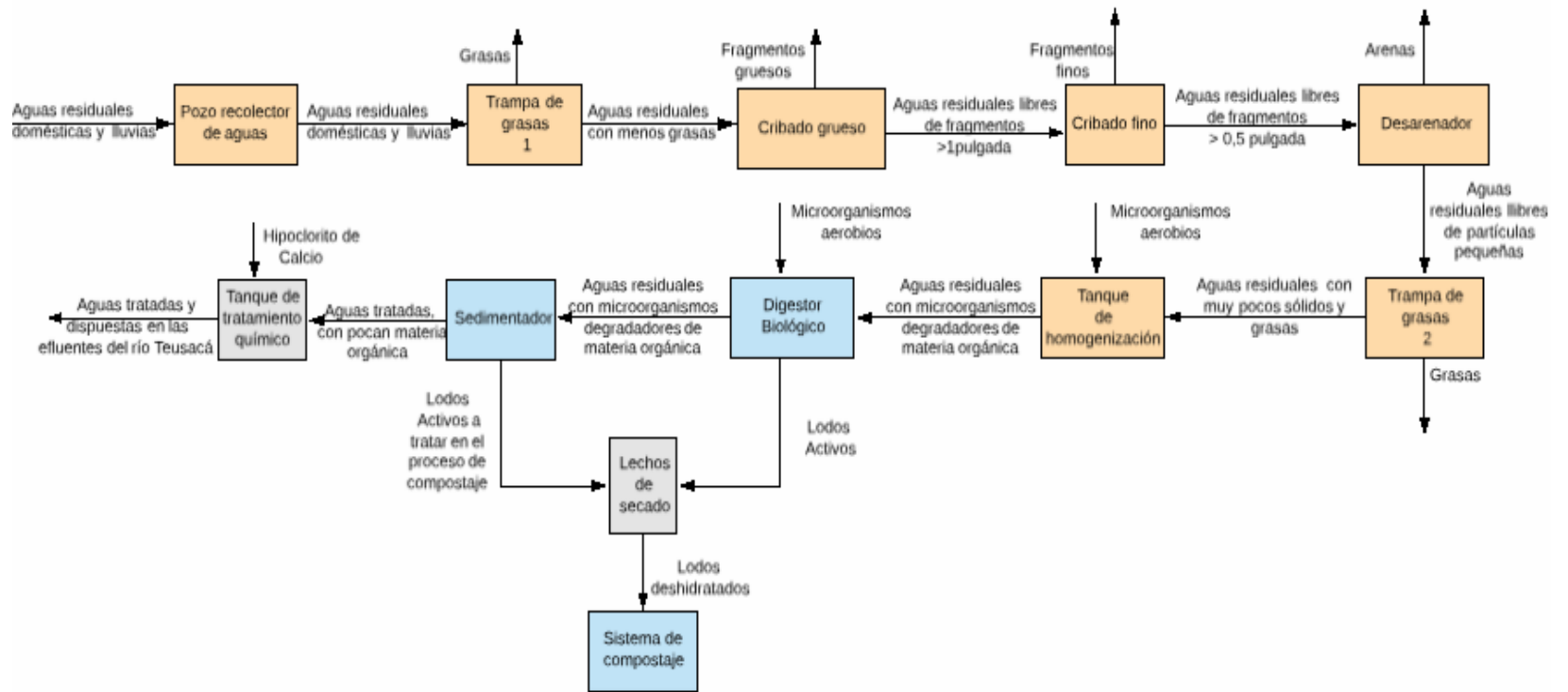
2. DIAGNÓSTICO

En el presente capítulo se contempla brevemente la descripción de los procesos de tratamiento de aguas residuales llevados a cabo en la PTAR del municipio de Sopó, Cundinamarca, tratamiento previo a la generación del lodo. Posteriormente, se procede al diagnóstico del lodo generado por la PTAR de Sopó, con el fin de conocer sus características aprovechables para la producción de un abono orgánico por medio de un proceso de compostaje.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UNA PTAR DE SOPÓ

La PTAR del municipio de Sopó cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, las cuales llegan del centro urbano de Sopó y el centro poblado rural la Diana (viviendas doméstica, hoteles y restaurantes) y aguas de lluvia con un caudal promedio de 8 L/s, las cuales son trasladadas por medio de tuberías de alcantarillado de asbesto cemento, y dirigidas a un pozo para su debido almacenamiento, y su posterior alimentación por medio de bombas y tuberías de transferencia a los diferentes procesos. Estos procesos se comprenden en tres partes: tratamiento preliminar, tratamiento secundario y por último lechos de secado, los cuales se contemplan en la figura 5.

Figura 5. Diagrama de proceso planta de tratamiento de aguas residuales de Sopó, Cundinamarca.



Fuente. Elaboración propia, basado en EMSERSOPÓ, 2018.

A continuación, se describen los procesos de cada fase de tratamiento de las aguas residuales en la PTAR de Sopó.

2.1.1 Tratamiento preliminar. Pre-tratamiento donde se mide y regula el caudal de agua que ingresa a la planta, y, adicional a esto, se extraen los sólidos, arena y grasas. Consta de operaciones en trampa de grasas, rejillas de cribado grueso y fino, desarenador, y tanque de homogenización.

2.1.1.1 Trampa de grasas 1. La trampa de grasas comprende tres cámaras, la cámara de entrada, cámara de salida y estructuras de separación entre estas, creando de esta manera una tercera cámara intermedia en la que las grasas y aceites quedan retenidos para luego ser removidos por flotación. Se generan alrededor de 30 kg de grasas mensuales¹²⁸, las cuales son recolectadas y enterradas en una cavidad. (ver imagen 1).

Imagen 1. Trampa de grasas.

(a) Cámara 1. Alivio



Fuente. Elaboración propia.

(b) Cámara 3. Salida



Fuente. Elaboración propia.

2.1.1.2 Cribado grueso. Está constituido por rejillas de barra que se encuentran separadas por una distancia de 1 pulgada e inclinadas a 45°, para llevarse a cabo la agrupación de los fragmentos más gruesos contenidos en la mezcla de aguas, con el fin de eliminarlos y enviar las aguas libres de éstos a otra etapa de cribado.

2.1.1.3 Cribado fino. Se fundamenta en la separación de los sólidos de menor tamaño por medio de rejillas que se encuentran inclinadas a 30° y separadas por una distancia de 0,5 pulgadas, para luego ser eliminados.

¹²⁸ Empresa de servicios públicos de Sopó (EMSERSOPÓ).

Imagen 2. Sistema de cribado grueso y fino.



Fuente. Elaboración propia.

2.1.1.4 Desarenador. Estructura rectangular, cuyo mecanismo es de flujo vertical. Se basa en la reducción de la velocidad del agua y de las turbulencias, permitiendo la remoción de arenas y sólidos que están en suspensión en el agua mediante un proceso de sedimentación, para luego ser retirados periódicamente. Se decanta el 70% del agua, para luego acontecer a los vertederos. Se generan aproximadamente 280 kg de arena mensual.

2.1.1.5 Trampa de grasas 2. Operación de eliminación de grasas y aceites presentes en las aguas recolectadas, se distingue de la trampa de grasas 1, anteriormente mencionada, en cuanto a su diseño y mecanismo. Esta trampa de grasas comprende una estructura de tubo hacia abajo en forma de T, que obliga a todas las partículas de poco peso ser atrapadas al no poder llegar hasta el fondo, para poder salir de ella (ver imagen 3).

Imagen 3. Trampa de grasas con estructura tubo en forma de T.



Fuente. Elaboración propia.

2.1.1.6 Tanque de homogenización. El tanque de homogenización está diseñado para amortiguar por laminación las variaciones de caudal, permitiendo así, lograr un efluente uniforme en cuanto a características y caudal. A este tanque le integran microorganismos y se le mantiene un vertimiento de agua constante para permitir la aireación. Con ello, se produce por una parte, la igualación de caudales que trae consigo la disminución de la concentración de contaminantes, se neutraliza el pH, previene la emanación de malos olores, y oxida el sulfuro y sulfato de la mezcla, y por otra parte, proporciona la descomposición de la materia orgánica (ver imagen 4).

Imagen 4. Tanque de homogenización.



Fuente. Elaboración propia.

2.1.2 Tratamiento secundario. La segunda etapa del tratamiento de la PTAR abarca un tratamiento biológico, en el que intervienen microorganismos aerobios para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable por medio de biodigestores. Y operaciones dentro de sedimentadores, mediante los cuales, se obtiene el agua que será tratada con Hipoclorito de Calcio y los lodos más concentrados y espesos. Consta de dos biodigestores cada uno con su respectivo sedimentador y vertedero. No se requiere de un tratamiento químico riguroso, dado que las aguas que llegan a ser tratadas, no contienen químicos considerados peligrosos, debido a que no presentan aportes de industrias.

2.1.2.1 Biodigestores. La PTAR cuenta con dos biodigestores aerobios, con el fin de respaldarse uno al otro, en caso de que alguno deba interrumpir su ciclo. El primero tiene capacidad para 140 metros cúbicos de agua, contiene 30 difusores de 0,04 micras y un sistema soplador que se compone de un pistón para la inyección de 1,5mg/L de Oxígeno dentro del sistema. El otro biodigestor, tiene una capacidad más pequeña en cuanto a volumen y reduce el número de difusores a la mitad, respecto al primer biodigestor.

En comparación con el anterior biodigestor, este consta de una turbina para la generación de aireación dentro del sistema. Dentro de éstos se encuentra una cantidad de flora bacteriana aerobia, que permite la descomposición de la materia orgánica y poseen instalaciones de tuberías para la evacuación de lodos y para la transferencia del agua al sedimentador. El tiempo de retención, es de 8 a 9 horas y su flujo de agua es continuo (ver imagen 5).

Imagen 5. Biodigestor con sistema de inyección de aire por pistón.



Fuente. Elaboración propia

2.1.2.2 Sedimentadores. La PTAR cuenta con dos sedimentadores tipo tanque de imhoff, cada uno conectado a su respectivo biodigestor como sistemas independientes. Se encuentran divididos en dos compartimientos: cámara de sedimentación, donde se remueven una significativa parte de los sólidos sedimentables, los cuales resbalan por las paredes inclinadas del fondo de la cámara de sedimentación. Y cámara de digestión de lodos. Ambas zonas, se encuentran separadas por una estructura abierta en el fondo e impide que los gases pasen de la zona de digestión a la de sedimentación evitando, de este modo, que afecten a la decantación de los sólidos (ver imagen 6).

Los lodos acumulados en el digestor, y en el sedimentador se extraen periódicamente y se conducen a lechos de secado, éstos lodos son empleados en el proceso de compostaje.

Imagen 6. Sedimentadores imhoff.



Fuente. Elaboración propia

2.1.2.3 Tanque de desinfección. Estructura rectangular (ver imagen 7) donde se alimentan las aguas que emergen del proceso de sedimentación para ser tratadas con bajas concentraciones de Hipoclorito de calcio, con el fin de reducir la flora bacteriana (coliformes, *ecoli*). Terminado este proceso, las aguas se encuentran en condiciones aceptables según la resolución 631 de 2015, para ser dispuestas a la cuenca Teusacá.

Imagen 7. Tanque de desinfección.



Fuente. Elaboración propia

2.1.3 Lechos de secado. Los lodos generados en los procesos dentro de los biodigestores y sedimentadores, son impulsados por medio de bombas y tuberías hacia unas canaletas que contienen arena y grava como materiales filtrantes, llevándose así el proceso de deshidratación de los lodos que puede abarcar aproximadamente 36 días de secado, hasta formar una torta de lodo. En la PTAR se están produciendo mensualmente alrededor de 650 Kilogramos de lodos base húmeda .

Seguido a esto, se realiza una purga de lodos efectuada periódicamente. Se estabilizan los lodos previamente secados con cal para la disminución de olores y mantener un pH alcalino.

En la imagen 8, se puede apreciar la evolución del proceso de deshidratación de los lodos.

Imagen 8. Evolución del proceso de deshidratación de lodos.



(a) Rebosamiento de lodo

(b) Lodo con 7 días de deshidratación

(c) Lodo con 36 días de deshidratación

Fuente. Elaboración propia.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL LODO

2.2.1 Caracterización físico-química y microbiológica. Para la determinación de los principales parámetros del lodo, se realizó un protocolo de muestreo por cuarteos, acudiendo a la norma NTC5667-1: Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas¹²⁹. Dicho procedimiento abarcó la toma de una porción de distintos puntos y profundidades de la torta de lodo que se encuentra en el lecho de secado, teniendo en cuenta de no tomar porciones de las capas superiores, las cuales se desecan formando costras, que permiten el incremento de la actividad anaerobia ni tomar parte del lecho de arena, de esta manera, se evitaron errores en los futuros análisis. Se tomó 1 kilogramo de masa de muestra para análisis fisicoquímicos y 100 gramos para análisis microbiológico; cantidades suficientes para los análisis requeridos y para cualquier análisis repetido.

Seguido a la toma de porción de lodo, se realizó una reducción de tamaño de la muestra por medio de la técnica de cuarteo, la cual consistió en dividir la porción en cuatro montículos iguales en forma de conos (ver Imagen 9), y mezclar dichos montículos tres veces hasta formar un montículo principal.

Consecutivamente, se ejecutó la división del montículo principal, formando cuartos, que son mezclados de forma opuesta entre ellos hasta obtener la masa de muestra requerida con los dos cuartos finales formados de la mezcla.

Luego de obtener la cantidad de masa requerida, se dispuso la muestra en bolsas de polietileno sellables (bolsas ziploc). La muestra se colocó en una bolsa interna, se selló y esta bolsa de muestra, se ubicó dentro de la bolsa exterior, la cual contiene el rotulado (ver imagen 10). De esta forma se evitó la generación de olores y gases al ambiente. Y finalmente, se almacenó la muestra, se introdujo en una nevera portátil a temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, y evitó su exposición al sol por tiempo prolongado, con el fin de evitar la pérdida de elementos volátiles y minimizar el cambio inducido biológicamente.

¹²⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. p. 13.

Imagen 9. Cuarteo en montículos de lodo.



Fuente. Elaboración propia.

Esta muestra se llevó al centro de biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, donde se realizaron análisis fisicoquímicos, siguiendo la norma NTC 5167¹³⁰, de los parámetros de Humedad, densidad aparente, Carbono orgánico, materia orgánica, cenizas, relación Carbono/ Nitrógeno, pH, conductividad eléctrica, Nitrógeno total, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Sodio y análisis microbiológicos, con base a la NTC 4092¹³¹ para conteo de microorganismos aerobios mesófilos, *E.coli* y coliformes fecales y totales.

En los análisis fisicoquímicos, no se incluyó la determinación de metales pesados, debido al tratamiento que se le confiere al agua residual, al no realizarle procesos de desestabilización química por medio de la adición de sales metálicas como coagulantes químicos; y a la procedencia de estas aguas.

¹³⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMATIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167.Opt.cit.

¹³¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMATIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 4092.Guía general para el recuento de microorganismos. 1997.

Imagen 10. Muestra de lodo obtenida y llevada a análisis fisicoquímicos y microbiológicos.



Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 2, se describen los resultados de los parámetros analizados con su respectivo método analítico.

Tabla 2. Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lodo y su metodología.

Parámetro	Método	Unidades	Resultado
Fisicoquímico			
Humedad	Gravimétrico a 70 °C en 24 horas	%	78,63
Densidad aparente	Cilindro metálico	g / Cm ³	1,20
Carbono orgánico	Calcinación	%	6,08
Materia orgánica	Calcinación	%	13,19
Cenizas	Gravimétrico a 650 °C en 24 horas	%	38,30

Tabla 2. (Continuación)

Parámetro	Método	Unidades	Resultado
pH	Extracto de saturación	-logH+	7,40
Relación C/N		P:P	12,36
Conductividad eléctrica	Extracto de saturación	dS / m	4,20
Nitrógeno Total	Kjeldahl	%	0,49
Fósforo	Colorimetría	kg/Ton	0,9
Potasio	Absorción atómica	kg/Ton	0,4
Calcio	Absorción atómica	kg/Ton	11,1
Magnesio	Absorción atómica	kg/Ton	0,3
Sodio	Absorción atómica	kg/Ton	0,1
Microbiológico			
Microorganismos aerobios mesófilos	Incubación de 24 a 48 horas y recuento en placa	UFC / g	>1000 x 10 ⁴
Coliformes fecales	Incubación de 24 a 48 horas y recuento en placa	UFC / g	7 x 10 ⁴
Coliformes totales	Incubación de 24 a 48 horas y recuento en placa	UFC / g	3,2 x 10 ⁶
Ecoli	Incubación de 24 a 48 horas y recuento en placa	UFC / g	3 x 10 ⁴

Fuente. Elaboración propia, basado en resultados de Centro de Biosistemas Jorge Tadeo Lozano.

En la Tabla 2. Se evidenció un porcentaje de humedad de 78,63%, lo que indica que la humedad se encuentra alta, según Martínez.,et al.(2013)¹³² ; y

¹³² MARTINEZ, M., PANTOJA, A., ROMÁN, P. Op. Cit. p.26.

Kalamdhad., et al.(2009)¹³³; quienes demuestran que el contenido propicio de humedad para la biodegradación puede variar ampliamente para diferentes mezclas de compost, que van desde cerca del 40% hasta el 65 % sobre base húmeda. Por consiguiente, se extendió el proceso de secado del lodo y se mezcló con materiales estructurantes con bajo contenido de humedad al inicio el compostaje.

En lo referente a la relación Carbono / Nitrógeno, según los resultados de los análisis, se evidenció que el lodo tiene una relación Carbono / Nitrógeno de 12,36, la cual resulta alta en comparación con otras caracterizaciones de lodos similares. El autor Kabbashi, Nassereldeen (2011)¹³⁴, encontró que el intervalo C/N indicado para el compostaje aerobio que involucre lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra entre 15 y 30 unidades de carbono por cada unidad de nitrógeno disponible, esto implicó la necesidad de recurrir a materiales estructurantes que permitieron el incremento de la relación de C/N. La suplementación de materiales estructurantes, también proporcionan un espacio de aire libre efectivo y una dispersión de vacíos en el compostaje¹³⁵ que permite un adecuado intercambio de agua y gas entre las fases de gas y sólidos, y evitar la compactación excesiva de Los materiales de compostaje¹³⁶.

En cuanto al valor de pH del lodo, correspondiente a 7,4, es característico de un lodo activado (pH de 6 a 8)¹³⁷, es idóneo para que los microorganismos se puedan desarrollar y el proceso presente efectividad. El pH inicial del proceso depende del tipo de mezcla de residuos a compostar, sin embargo, los comprendidos entre 5 y 8, son los que se consideran propicios, puesto que una considerable acidez del material afecta el proceso durante la fase inicial de aumento de la temperatura¹³⁸.

Por otra parte, el fósforo y macroelementos como potasio, calcio, magnesio y sodio, desempeñan un papel fundamental en la formación de compuestos ricos en energía, por lo que también deben estar presentes en cantidades mínimas para

¹³³ KALAMDHAD,A., KAZMI,A. Effects of turningfrequency on compost stability and some chemicalcharacteristics in a rotatory drum composter. *Chemospere* 72. 2009. p. 1327

¹³⁴ KABBASHI, Nassereldeen. Sewage sludge composting simulation as carbon/nitrogen concentration change. En: *Journal of environmental sciences*. November 2011.vol. 23, no. 11, p. 1928.

¹³⁵ IQBAL, M.K., T. Shafiq, K. Ahmed. Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost. *Bioresour. Technol.* 101. 2010.p.1913–1919.

¹³⁶ KULCU, R., O. Yaldiz. Composting of goat manure and wheat straw using pine cones as a bulking agent. *Bioresour. Technol.* 2007. P. 2700–2704

¹³⁷ TRGOVICICH, B., KIRSCH, E., GRADY, C. Characteristics of Activated Sludge Effluents before and after Breakpoint Chlorination. *Journal (Water Pollution Control Federation)*.1987. p. 966-976.

¹³⁸ Sundberg, C., Smars, S., Jönsson, H. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. 2004. P. 45-50.

que el proceso de compostaje se lleve a cabo correctamente¹³⁹. Sin embargo, es comprobado que en el proceso del compostaje, se produce un aumento de éstas concentraciones debido a la pérdida de materia orgánica de la masa a compostar (mineralización de componentes)¹⁴⁰.

Según Kehl, 1985¹⁴¹, el conocimiento del contenido de materia orgánica presente al inicio del compostaje es fundamental, pues se considera como el primer factor para determinar la calidad agronómica del compost obtenido. La muestra de lodo analizada tiene un contenido de materia orgánica bajo (13.19%), pero se puede mejorar con la inclusión de otros materiales orgánicos al inicio del proceso de compostaje. Por acción de los microorganismos, a medida que transcurre el proceso de compostaje, la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico y agua¹⁴². La velocidad de transformación de la materia orgánica depende de su naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y de las condiciones fisicoquímicas del proceso¹⁴³.

La conductividad eléctrica al inicio del compostaje no es trascendental, éste parámetro tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de nutrientes¹⁴⁴.

A nivel fisicoquímico, de acuerdo con la normatividad nacional vigente, para la caracterización de los lodos resultantes de tratamiento de aguas residuales, se deben tener en cuenta los valores máximos y mínimos permitidos de los parámetros más relevantes de los lodos para su posterior uso.

En la Tabla 3, se contemplan los valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos según el decreto 1287 de 2014, por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y emitido por el Ministerio de vivienda, ciudad y territorio.

¹³⁹ MÁRQUEZ, Pedro., BLANCO, Manuel Jesús., CABRERA, Francisco. Op. Cit. p.6.

¹⁴⁰ MICHEL, F.C., PECCHIA, J.A., RIGOT, J. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci.* p. 323-334. 2004.

¹⁴¹ KIEHL, F.J. Fertilizantes orgánicos. Editora agronómica Ceres Ltda. Sao Paulo. 1985.

¹⁴² HAUG, R.T. Op. Cit.

¹⁴³ MICHEL, F.C., PECCHIA, J.A., RIGOT, J. Op. Cit.

¹⁴⁴ SÁNCHEZ MONEDERO M. A., ROIG, A., Paredes, C., BERNAL M.P. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Biores Technol.* 2001.p. 301-308.

Los biosólidos deberán cumplir con los valores máximos permisibles establecidos en esta tabla para su posterior uso como enmienda, abono o fertilizante, se clasifican en una de las siguientes categorías: Categoría A y Categoría B.

Tabla 3. Valores microbiológicos máximos permisibles según caracterización de biosólidos.

Variable	Unidad de medida	Categoría de biosólidos Valores máximos permisibles	
		Categoría A	Categoría B
Coliformes fecales	Unidades formadoras de colonias UFC / g de biosólido (base seca)	<1,00 E (+3)	<2,00 E (+6)
Huevos de helmintos viables	Huevos de helmintos viables / 4g de biosólido (base seca)	<1	<10
<i>Salmonella sp</i>	Unidades formadoras de colonias UFC / 25 g de biosólido (base seca)	Ausencia	<1,00 E (+3)
Virus entéricos	Unidades formadoras de placas UFP / 4g de biosólido (base seca)	<1,0	-

Fuente. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287. Disponible en <http://www.minvivienda.gov.co/Decretos%20Vivienda/1287%20-%202014.pdf>.

De acuerdo con los valores exigidos en cuanto a variables microbiológicas, y a los resultados de la caracterización microbiológica, este lodo es categorizado como lodo B, según el conteo de coliformes fecales, lo que indicó que puede ser usado como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos que modifiquen su calidad original¹⁴⁵. Hay presencia de *E.coli*, lo cual resulta muy habitual por proceder de aguas residuales domésticas, puesto que se encuentran en el tracto gastrointestinal de los humanos. La cuantificación de estos microorganismos (coliformes totales, fecales y *E. coli*) resultó alta, lo que indica que la planta de tratamiento no está realizando un buen proceso de tratamiento biológico, resulta importante corregirlo por medio de tratamiento químico o biológico. Con respecto a los microorganismos aerobios mesófilos, se observa que hay una enorme cantidad de estos ($>1000 \times 10^4 \text{ UFC/g}$), lo que resulta favorable para el proceso de compostaje, al realizarse de manera aerobia.

¹⁴⁵ Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. Decreto 1287.2014. p. 4-5.

3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL FERTILIZANTE ORGANO-MINERAL

El presente capítulo hace referencia al procedimiento que corresponde a la selección del sistema de compostaje a emplear, el cual se realiza por medio de una matriz de selección basada en los criterios: Eficiencia, disponibilidad de espacio, facilidad de control, facilidad de mantenimiento, tiempo empleado, costos y recursos (mano de obra), disponibilidad de materiales, peligrosidad. De igual manera, se describe la metodología empleada para el proceso de compostaje en el sistema escogido, junto a las variables involucradas en la experimentación y su respectivo seguimiento a través de la medición de parámetros principales, como: pH, Temperatura, contenido de Humedad y cenizas. Y finalmente, abarca el balance de materiales para la inclusión de minerales al compost obtenido.

3.1 MATRIZ DE SELECCIÓN SISTEMA DE COMPOSTAJE

Son varios los sistemas y técnicas que se pueden emplear para llevar a cabo el proceso de compostaje, según la literatura, éstos se dividen en sistemas abiertos y sistemas cerrados, expuestos en el cuadro 1. Los sistemas abiertos comprenden pilas con volteo y pilas estáticas, estas últimas mediante técnicas con aireación pasiva y aireación forzada (Succión, Insuflado con o sin control de temperatura, alternada) Por otro lado, los sistemas cerrados implican reactores, que pueden ser verticales que operan de manera continua o discontinua y reactores horizontales, los cuales pueden ser de dos formas, estáticos o con movimiento del material (volteo).

Cuadro 1. Sistemas y técnicas de compostaje.

Sistemas abiertos	Forma de operación	Técnica	Sistemas cerrados	Forma de operación
Pilas con volteo			Reactores verticales	Continuos
Pilas estáticas	Aireación pasiva			Discontinuos
	Aireación forzada	Succión	Reactores horizontales	Estáticos
		Insuflado		Con movimiento del material
		Alternada		

Fuente. Composting of Agricultural and other wastes. Disponible en https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-1569-5_51.

Cada uno de estos sistemas opera a condiciones diferentes y requieren de distintas medidas de control sobre el proceso, lo que los hace simples o complejos.

Para lograr un mayor nivel de confianza en el proceso de selección, se ajustaron las alternativas de sistemas de compostaje junto a cada criterio a evaluar, lo cual consistió en reunir y organizar toda la información posible de cada una de ellas, a través de herramientas bibliográficas confiables. Todas las alternativas propuestas se prepararon en absoluto con la misma metodología, de tal manera tuvieron la misma oportunidad de ser escogidas y de que no se presentaran sesgos en su escogencia.

En la tabla 4 se presentan las ventajas y desventajas que engloba cada uno de los sistemas de compostaje que se evaluaron mediante la matriz de selección.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de compostaje.

Sistema de compostaje	Ventajas	Desventajas
Pila con volteo	Sistema sencillo y económico. El volteo se puede realizar de manera manual mediante pala cargadora, o a través de maquinaria especializada. En este sistema, se remueve periódicamente la materia orgánica para homogeneizar la mezcla y la temperatura. Se pueden realizar controles automáticos de Temperatura, Humedad y Oxígeno. El volteo influye positivamente sobre la estructura física de la mezcla y las condiciones de aireación, aumentando la porosidad ¹⁴⁶ .	Si se manejan grandes volúmenes de materia orgánica, el espacio requerido es extenso, lo que puede llegar a comprometer costos significativos. De igual manera, se deben manejar espacios más amplios para poder mover la mezcla durante los volteos ¹⁴⁷ . No mantiene un nivel de oxigenación constante por lo que el proceso evoluciona más lentamente que en los sistemas con ventilación. Se generan malos olores por el contenido en agentes patógenos. Se presenta escape de gases al ambiente. Una mayor frecuencia de volteo requiere una labor intensiva ¹⁴⁸ . Riesgo de re inoculación durante el volteo por parte de los microorganismos situados en zonas no sometidas a elevadas temperaturas ¹⁴⁹ .

¹⁴⁶ ÁLVAREZ DE LA PUENTE, José M. Manual de compostaje para agricultura ecológica.p.9.

¹⁴⁷ Ibid. p. 25-26

¹⁴⁸ AJUNTAMENT DE BARCELONA. Guia de compostatge. Regidoria de Ciutat Sostenible. 1998.

¹⁴⁹ TORTAROLO, María Fernanda., PEREDA, Matías., PALMA, Martha., ARRIGO, NILDA Marta. Influencia de la inoculación de microorganismos sobre la temperatura en el proceso de compostaje. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina. 2008. p. 42.

Tabla 4. (Continuación)

Sistema de compostaje	Ventajas	Desventajas
Pila estática con aireación pasiva	Sistema apropiado al realizarse un análisis coste/ eficacia. Para permitir la ventilación natural, se requiere de estructuras simples que permiten un mejor flujo de la masa de aire desde la parte inferior hacia la zona superior de la pila. Se logran buenos resultados de una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras se mantengan las condiciones aerobias y el contenido de humedad. Una vez formada la pila, no se moverá del sitio ¹⁵⁰ .	El tamaño y forma de la pila puede ser extenso, dependiendo del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición. El tiempo de duración, depende del material a compostar, la cantidad de residuo y la no homogeneización de la mezcla, puede ser largo (hasta 4 meses) ¹⁵¹ . Generación de gases al ambiente. Por la presencia de agentes patógenos se pueden presentar malos olores. No se puede emplear cualquier residuo orgánico en diferentes condiciones ¹⁵² .
Pila estática con aireación forzada	Permite tener un mayor control de la concentración de Oxígeno y mantenerla en un intervalo apropiado, esto favorece la actividad metabólica de los microorganismos aerobios. Se puede llevar a cabo por varias vías: Por succión, insuflado y alternada. Puede realizarse de forma: Continua o a intervalos. Una vez formada la pila, no se moverá del sitio ¹⁵³ .	Sistema de costo más elevado comparado con los anteriores, requiere de sistemas de aireación, los cuales suministran aire a presión, suelen operar a temperaturas elevadas y hay gasto energético. Este sistema tiene como principal inconveniente una falta de homogeneización de la masa, lo que conlleva a que el material pueda presentar compactaciones produciendo de esta manera zonas anaerobias y por ende se vuelve lento el proceso. Generación de gases al ambiente que no son controlados ¹⁵⁴ .
Reactor vertical continuo	Permite un mayor control de las condiciones del proceso y de las emisiones. Se Pueden incluir sistemas de medición (temperatura, oxígeno, etc.) y sistemas de mezcla interna. Menor tiempo de residencia. Por ser un sistema cerrado, no se generan olores ni gases al ambiente ¹⁵⁵ .	Presenta elevados costos de inversión, de mantenimiento y energéticos. Suelen tener alturas superiores a los 4 metros, lo que requiere de personal especializado. Presenta inconvenientes al llevarse acumulaciones en el fondo del reactor y el material antes y después del proceso requiere adecuaciones ¹⁵⁶ .

¹⁵⁰ URRUTIA CHAPARRO, Jorge. Evaluación de la biodegradación de residuos sólidos ganaderos tratados mediante pilas de compostaje. 2013. p.14.

¹⁵¹ PANTOJA, MARTINEZ Y ROMÁN. Op.Cit. p. 30.

¹⁵² PORCEL, Álvaro Marcelo. Sistema de gestión de residuos sólidos orgánicos en el régimen abierto para varones del centro de rehabilitación Santa Cruz- Palmasola.

¹⁵³ DOCAMPO, Roberto. Compostaje y compost. Revista INIA. 2013. p. 64-64.

¹⁵⁴ PANTOJA, MARTINEZ Y ROMÁN. Op.Cit. p. 30-31.

¹⁵⁵ De Bertoldi, M.; Vallini, G., Pera, A. 1985. Composting of Agricultural and other wastes.p.30.

¹⁵⁶ Ibid. p.31

Tabla 4. (Continuación)

Sistema de compostaje	Ventajas	Desventajas
Reactor vertical discontinuo	Permite un mayor control de las condiciones del proceso y de las emisiones. Se Pueden incluir sistemas de medición (temperatura, oxígeno, etc.) y sistemas de mezcla interna. Menor tiempo de residencia. Costo inicial menor que la de los reactores continuos. Su operación es más sencilla. Por ser un sistema cerrado, no se generan olores ni gases al ambiente ¹⁵⁷ .	Presenta elevados costos de construcción, de mantenimiento y energéticos. Contienen a diferentes alturas, pilas de 2 a 3 metros con un sistema de aireación forzada o volteo hacia pisos inferiores. Tiene una baja relación coste por unidad de volumen de trabajo. Costo de operación es mayor que la de los reactores continuos. Requiere un ciclo de operación complicado. El tiempo de residencia es grande, más si se desea obtener una calidad máxima ¹⁵⁸ .
Reactor horizontal estático	Permite un mayor control de las condiciones del proceso y de las emisiones. Se Pueden incluir sistemas de medición (temperatura, oxígeno, etc.) y sistemas de mezcla interna. Menor tiempo de residencia. Ahorran espacio pues presentan una inmejorable relación entre el volumen de residuo tratado y la superficie ocupada. Son dispositivos más sencillos al carecer de movimiento propio o de elementos mecánicos internos. Por ser un sistema cerrado, no se generan olores ni gases al ambiente ¹⁵⁹ .	Presenta elevados costos iniciales. No existe mezcla del material durante el proceso. La falta de volteos del material incide negativamente sobre la calidad y madurez del compost final. Generalmente sólo se usa al inicio del proceso, como preparación del material para luego dejarlo madurar en el exterior del reactor (en una pila, por lo general); por ello, el tiempo de compostaje se torna menor ¹⁶⁰ .

¹⁵⁷ Ibid.p.31-32

¹⁵⁸ Ibid.p.32-33

¹⁵⁹ NEGRO, M., VILLA, F., AIBAR, J., ARACÓN, R., CIRIA, P., CRISTÓBAL, M. V., BENITO, A., GARCÍA MARTÍN, A., GARCIA MURIEDAS, G., Labrador, C., LACASTA DUTOIT, Carlos., LEZAÚN, J. A., MECO, R., PARDO, Gabriel., SOLANO, M. L., TORNER, C., ZARAGOZA, C. Op. Cit. p.17.

¹⁶⁰ DE BERTOLDI, M.; VALLINI, G., PERA, A. Op. Cit.

Tabla 4. (Continuación)

Sistema de compostaje	Ventajas	Desventajas
Reactor horizontal con volteo	<p>Permite un mayor control de las condiciones del proceso y de las emisiones. Se Pueden incluir sistemas de medición (temperatura, oxígeno, etc.) y sistemas de mezcla interna. Menor tiempo de residencia. Ahorran espacio pues presentan una inmejorable relación entre el volumen de residuo tratado y la superficie ocupada. El reactor puede tener internamente estructuras que permiten el mezclado.¹⁶¹ El tiempo de retención en el reactor es corto al ser de 3 a 20 días, dependiendo de las condiciones. Los gases generados en el proceso son tratados por medio de filtros. El aislamiento empleado en ellos permite la preservación de calor, lo cual aumenta la temperatura para eliminar los patógenos. Al ser un sistema cerrado, no hay escape de gases ni se generan malos olores¹⁶².</p>	<p>El costo inicial es muy alto, esto se debe por el requerimiento de control de las variables principales para su adecuado funcionamiento, los materiales de construcción, su mantenimiento y la necesidad de personal especializado para su manejo. El material después del proceso requiere de adecuaciones¹⁶³.</p>

Fuente. Elaboración propia, basado en recolección bibliográfica.

¹⁶¹ WEHRHAHN, Cristián. Compostaje como Solución de Manejo de Residuos Sólidos. Universidad de Chile. Abril 22, 2006.

¹⁶² De Bertoldi, M.; Vallini, G., Pera, A. Op. Cit.

¹⁶³ De Bertoldi, M.; Vallini, G., Pera, A. Op. Cit.

3.1.1 Establecimiento de matriz de selección. La selección del proceso de compostaje implicó el análisis de las variables que intervienen en dicho espacio, de tal manera que se contribuya efectivamente a la sostenibilidad ambiental y económica. Esto requirió de la adopción de una alternativa, donde se analizó su desempeño, tomando como referencia distintos criterios. En el cuadro 2 se consideran los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección del sistema de compostaje.

Cuadro 2. Criterios relevantes para la selección del sistema de compostaje.

Criterios	Justificación
Costos y recursos mano de obra	Corto presupuesto para la realización del proyecto.
Tiempo empleado	Aprovechamiento de recursos en el menor tiempo por insuficiencia de instalaciones apropiadas para el almacenaje y control de residuos.
Eficiencia	Estimación de cantidades necesarias de material inicial para su alta transformación en producto de buena calidad.
Disponibilidad de espacio	Espacio suficiente para implementación de las instalaciones requeridas, cerca al lugar de recepción de las materias primas para no generar costos adicionales en transporte o pago de alquiler de terreno.
Peligrosidad	Buen manejo y control de procesos acorde a la reglamentación: emisiones, olores, plagas, enfermedades.
Facilidad de control	Disposición de control de variables en tiempos estimados para determinar el avance del proceso y detectar posibles fallas.
Facilidad de mantenimiento	Factible asepsia de lote de proceso, limpieza de maquinaria y equipos para evitar la entrada de contaminación.
Disponibilidad de materiales	Facilidad de adquisición de materiales iniciales cumpliendo con la fecha estipulada de entrega del producto final.

Fuente. Elaboración propia.

En la selección del proceso de compostaje, se tuvo en cuenta que el criterio de mayor ponderación es importante pero no necesariamente es el único relevante, y que los criterios con menor ponderación, son igualmente importantes para el análisis de resultados. A continuación se presentan en el cuadro 3 las alternativas como sistema de compostaje.

Cuadro 3. Alternativas como sistema de compostaje.

ALTERNATIVAS	
1	Pila con Volteo
2	Pila estática (aireación forzada)
3	Reactor vertical con volteo
4	Reactor vertical estático
5	Reactor horizontal con volteo
6	Reactor horizontal estático

Fuente. Elaboración propia.

Seguido al establecimiento de criterios, se definió el método multicriterios de toma de decisión. El método seleccionado es el pugh, su designación en honor a su creador británico Stuart Pugh, quien fue un reconocido ingeniero de diseño.

La matriz de Pugh¹⁶⁴ es una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones mediante un arreglo multidimensional, a través de una selección ponderada o convergencia controlada. Éste método se utiliza para comparar lógicamente diferentes opciones basadas en criterios predefinidos y en el modelado de preferencias. Se asignó un valor puntual a cada criterio, considerando la importancia que tenga sobre los demás criterios, la puntuación se realizó en forma de símbolo, ya sea una puntuación positiva, negativa o neutral. Luego se evaluó una sumatoria de los valores positivos, negativos y neutros y se multiplicaron por el factor de importancia del criterio, siendo el valor máximo de 3, de esta forma se obtuvo una salida numérica¹⁶⁵. La alternativa que obtuvo el valor más alto, es la más compatible y la que se implementó en el proyecto. En la tabla 5 se efectúa la demostración del desarrollo de la matriz de selección del proceso de compostaje.

¹⁶⁴ Pugh, S. Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. Addison-Wesley.1991.

¹⁶⁵ Ibid.

Tabla 5. Matriz de selección de proceso de compostaje a emplear en la propuesta.

Criterios	Clasificación (1-3)	Alternativas					
		1	2	3	4	5	6
Eficiencia	3	-	0	+	+	+	+
Disponibilidad de espacio	2	-	-	0	0	+	+
Facilidad de control	1	0	+	+	+	+	+
Facilidad de mantenimiento	1	-	-	-	-	+	+
Tiempo empleado	3	-	-	+	0	+	0
Costos y recursos mano de obra	3	+	+	-	-	-	-
Disponibilidad de materiales	1	+	-	-	-	-	-
Peligrosidad	2	-	-	+	+	+	+
Total	16						
Suma de positivos		2	2	4	3	6	5
Suma de negativos		5	5	3	3	2	2
Suma de neutros		1	1	1	2	0	1
Suma ponderada de positivos		4	4	9	6	12	9
Suma ponderada de negativos		11	9	5	5	4	4
Total		-7	-5	4	1	8	5

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo con lo evaluado en la matriz de selección (Tabla 5), el sistema reactor horizontal por volteo resultó ser el más conveniente para implementarse, de acuerdo con las necesidades y criterios establecidos por la PTAR, el cual obtuvo un puntaje ponderado de 8. Al efectuar este sistema de compostaje, se determinó las especificaciones de operación del mismo, como lo es la técnica de aireación y el sistema de calentamiento y preservación de calor.

En el estudio de los autores Kulcu, R y Yaldiz, O (2007)¹⁶⁶, sobre las direcciones de flujo de aire en reactores para proceso de compostaje, se emplearon tres técnicas; succión (hacia abajo), soplado (hacia arriba) y mezclado. En este estudio la aireación de los reactores fue manejada por ventiladores radiales y los

¹⁶⁶ KULCU, R., YALDIZ, O. Effects of air flow directions on composting process temperature profile. 2008.

resultados mostraron que en la técnica de mezclado se presenta una distribución de temperatura más homogénea, mientras que, en las otras técnicas, la temperatura es más heterogénea.

Para esta experimentación, se implementó una técnica de aireación por mezclado, que se llevó a cabo por la técnica de volteo de manera manual, siendo ésta, eficiente y de menor costo.

Para la configuración del sistema de calentamiento y preservación del calor, se revisó el estudio realizado por I. G. Mason y M. W. Mike (2005)¹⁶⁷, en él, los autores clasificaron los tipos de configuraciones en reactores como: temperatura fija, autocalentamiento, diferencia de temperatura y flujo de calor controlado. Estas configuraciones resultan bastante costosas al momento de invertir en controles de temperatura mecanizados y en el consumo energético en su operación, a excepción del autocalentamiento, que requiere de una cubierta tipo aislante. Por esta razón, se seleccionó la configuración de autocalentamiento, siendo la más eficiente y de menor costo para este sistema.

3.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTACIÓN

En esta etapa se realizó la adecuación previa del lodo y materiales de soporte empleados en el compostaje, el balance de carga inicial, y se homogenizó la mezcla. Se describió el seguimiento de las variables establecidas, de humedad, pH, cenizas, temperatura y aireación. De igual forma, se realizó el diseño del sistema de compostaje.

3.2.1 Selección del material de soporte. En relación con los resultados de la caracterización de los lodos, para suplir los valores requeridos para cada parámetro relevante al inicio del compostaje, fue necesario incluir materiales de soporte, para este proyecto se utilizó papel de prensa y podas de césped, los cuales aportan un significativo contenido de carbono como fuente de alimento para los microorganismos degradadores de la materia orgánica, se encuentran biodisponibles en el municipio y que no requieren de mayor adecuación, debido a que son fáciles de triturar y su contenido de humedad es relativamente poco, lo que evita emplear largo tiempo en procesos de secado. Las tintas utilizadas en el papel periódico no son tóxicas¹⁶⁸

En los laboratorios de la Fundación Universidad de América se realizaron los análisis de contenido de humedad y cenizas para estos materiales, pero no se

¹⁶⁷ MASON, I. G. y MILKE, M. W. Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. En: Waste management. March, 2005. vol. 25, no. 5, p. 484

¹⁶⁸ STACY, SACKETT., FILED UNDER DESIGN. Is newspaper safe for your garden?.2016.

tenía dato propio de la relación carbono / nitrógeno de estos materiales. Por ello, se realizó una recolección bibliográfica de registros sobre la relación carbono/nitrógeno y se seleccionó el dato cuyo contenido de humedad era similar al hallado mediante análisis en el laboratorio.

Los documentos analizados en base a la caracterización de los materiales de soporte encontrados, son propios de estudios comprendidos en proyectos de grado y artículos en los que han sido caracterizados para su posterior uso como materia prima de proceso de compostaje. En la búsqueda bibliográfica, en cuanto a la caracterización de la poda de césped, el contenido de humedad que más se acercaba a la determinada por el previo análisis, es de 18,9%, y cuya relación C/N a esta condición, se encontraba en 21,3, siendo éste valor utilizado en la caracterización inicial de la poda de césped utilizada en esta experimentación.

Según Earth Green Colombia S.A.S¹⁶⁹, la relación C/N del papel de prensa es de 400:1 y tiene un contenido de humedad de 5 %.

Tabla 6. Caracterización inicial de materiales de soporte.

Material	Carbono orgánico total (%)	Nitrógeno total (%)	Relación C/N	Humedad (%)
Poda de césped	28,3	1,33	21,3	26
Papel periódico	40	1	400	5

Fuente. Earth Green Colombia S.A.S, 2018.

De acuerdo con la caracterización fisicoquímica de los materiales de soporte, se evidencia que el papel periódico contiene un valor relevante de Carbono (40%), para su efecto, una poca cantidad, contribuye en el resultado de una relación de C/N apropiada. De igual forma, el bajo porcentaje de humedad (5%), permite equilibrar la humedad de la mezcla inicial. Por otro lado, la poda de césped presenta una relación de C/N relativamente alta (21,3), en comparación con la aportada por el lodo residual (12,36), debido un menor contenido en Carbono que ostenta este lodo.

Para justificar este proyecto como un verdadero aprovechamiento de residuos, se establecieron las cantidades generadas mensualmente de éstos en el municipio;

¹⁶⁹ Earth Green Colombia S.A.S. [en línea]: <http://www.earthgreen.com.co/aprenda-mas-pyr/74-principios-basicos-del-compostaje>.

según registros entregados por la entidad Emersopó, se concierne un valor de 650 kg de lodos generados en la PTAR de Sopó, 3,73 toneladas de papel periódico y 2,8 toneladas de residuos de jardín. Es evidente que son cantidades significativas que pueden ser aprovechadas en el proceso de compostaje, mitigando la emisión de gases contaminantes que se generan al disponer éstos residuos en rellenos sanitarios o en procesos de incineración¹⁷⁰.

3.2.1.1 Recolección y acondicionamiento de sustratos. Los sustratos que se usaron para realizar el compostaje en esta investigación, corresponden a lodos procedentes de la PTAR de Sopó, Cundinamarca, podas de césped de campos verdes contiguos a la PTAR y papel periódico reciclado en este municipio.

Los lodos usados en esta investigación fueron extraídos a los 22 días de estar en proceso de deshidratación en los lechos de secado, sin embargo, luego de realizarse tomas de muestra por varias semanas para análisis de humedad y cenizas, en el momento de la recolección, el lodo tenía un contenido de humedad alto (78,63%). Teniendo en cuenta que la presencia de tal cantidad de agua da como resultado una disminución de la temperatura de compostaje, baja transferencia de oxígeno y tendencia a compactarse¹⁷¹, los lodos se extendieron al aire libre bajo sombra hasta obtener un porcentaje de humedad de 66%.

El sustrato de pasto, se obtuvo directamente de las podas de jardineras, para esto se utilizó una guadaña cortacésped que daba un pasto con un tamaño de partícula grande para su degradación durante el compostaje, por lo tanto, fue trozado con los dedos hasta un tamaño de partícula de 2,5-3 cm (SIRINATH R, Iyengar., PRASHANT P, Bhave; 2006)¹⁷², de esta manera se facilita su homogenización en la mezcla. Posterior a este acondicionamiento, el pasto se extendió en bolsas negras abiertas, permitiendo retirar parte de contenido de humedad, alcanzando hasta 26% de ésta.

¹⁷⁰ COLMENARES MAYANGA, Wagner. Generación y manejo de gases en rellenos sanitarios. 2007.

¹⁷¹ SILVA, Juan Pablo., LÓPEZ, Piedad., VALENCIA, Pady. Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. Escuela de Ingeniería de los Recursos naturales y del Ambiente (EIDENAR). Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería.p.7-8.

¹⁷² SIRINATH R, Iyengar., PRASHANT P, Bhave.In-vessel composting of household wastes. 2006.

Imagen 11. Poda de césped acondicionada.



Fuente. Elaboración propia.

El papel periódico fue cortado manualmente, hasta tamaño de partícula deseado (3 cm)¹⁷³ y recolectado en una bolsa de plástico negro, con un tiempo de retención de tres días hasta la preparación de la muestra.

Imagen 12. Papel periódico acondicionado.



Fuente. Elaboración propia.

¹⁷³ Ibid., p.2.

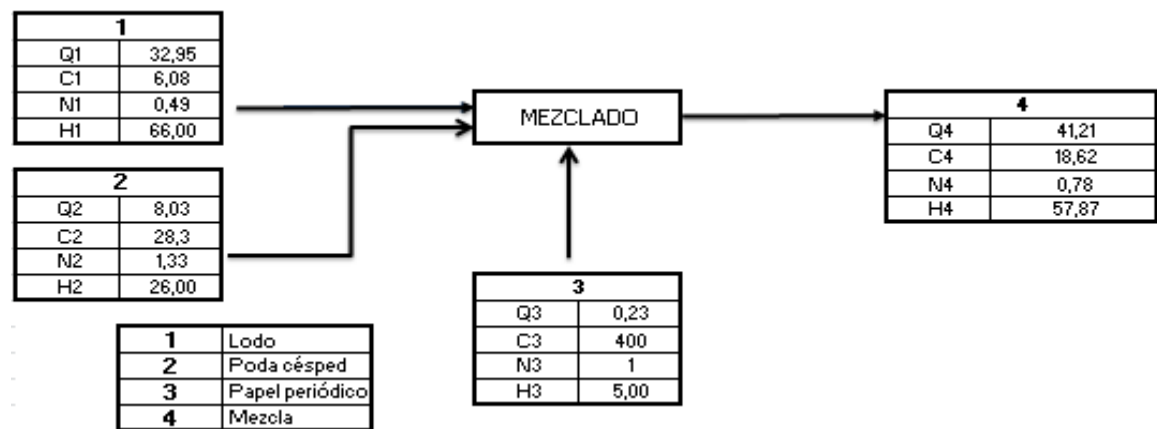
3.2.1.2 Balance de sustratos. Para un correcto compostaje, en el que se aproveche y retenga la mayor parte de carbono y nitrógeno, las condiciones iniciales deben ser las adecuadas. En esta fase, se realizó un balance por componente que involucró cantidad de carbono, nitrógeno y humedad; siendo éstos los parámetros más importantes al iniciar el compostaje.

Se tuvo en cuenta la capacidad de llenado máxima permisible de cada reactor a emplear en el experimento, su capacidad es dada en términos de volumen, por ello es necesario involucrar las densidades de cada material para obtener la masa requerida de cada componente, teniendo en cuenta que cada reactor se pretende llenar en un 80 % de su capacidad total, para facilitar el volteo, permitir una mejor aireación y mantener el calor interno del reactor¹⁷⁴. Se fijaron valores de relación C/N, en 23,75 y de humedad de un 58,85 %, como resultados deseados al realizarse el respectivo balance de materia, y así, obtener las cantidades apropiadas de lodo y materiales de soporte que suplan las condiciones impuestas.

Una vez establecidas las condiciones de llenado y los valores de variables iniciales, se resolvieron las ecuaciones de balance de materiales presentadas en el Anexo D.

Para una mejor ilustración, en la Figura 6, se expone el esquema del balance, con las respectivas corrientes de entrada y salida, cada una con sus pertenecientes variables en el proceso de mezclado.

Figura 6. Esquema del balance de materiales iniciales.



*Q: cantidad de material (kg), C: contenido de Carbono (g/L), N: contenido de Nitrógeno (g/L), H: porcentaje de humedad.

Fuente. Elaboración propia

¹⁷⁴ KALAMDHAD, A., SINGH, K. Assessment of bioavailability of heavy metals during rotary drum composting of green waste. Ecological engineering. 52. 2013..

Dado que el material objeto de estudio es el lodo de la PTAR, el criterio fundamental para la conformación del sistema de compostaje y selección de proporciones, se garantizó un 60% del mismo. El material de soporte se mantuvo en una proporción de 39% de podas de césped y 1% de papel de prensa.

En la Tabla 7 se muestran las cantidades y parámetros de cada reactor.

Tabla 7. Composición de cada reactor, proporción de los materiales utilizados y variables iniciales en el proceso de compostaje.

Material	Cantidad (kg)	Variables iniciales			
		pH	%H	%Cenizas	Temperatura (°C)
Lodo PTAR	32,95				
Poda césped	8,03	7,4	58,85%	21,52%	24
Papel periódico	0,23				

Fuente. Elaboración propia.

A continuación se observa la muestra físicamente introducida en los tres reactores.

Imagen 14. Mezcla de materiales en el interior de los reactores.



(a) Reactor 1

(b) Reactor 2

(c) Reactor 3

Fuente. Elaboración propia.

3.2.2 Construcción de tambor rotatorio. Previo a la construcción del reactor, se realizó una etapa de selección de materiales, con la finalidad de elegir los más aptos para el proceso, su respectiva adecuación y balance de material.

En esta etapa se describió la construcción del tambor rotatorio, teniendo dos réplicas más para llevar el proceso por triplicado y de esta forma minimizar distorsiones en los resultados. Los reactores fueron construidos mediante un contenedor plástico de 60 Litros, cuyas dimensiones y capacidad de llenado se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Dimensiones del contenedor plástico.

Dimensiones	Unidad	Valor
Capacidad	Litros	60
Altura	Metros	0,625
Diámetro exterior	Metros	0,400
Diámetro tapa	Metros	0,320
Peso	Kilogramos	3,4

Fuente. Tomado de Ballester, reciclado y gestión de envases industriales. [en línea]: <https://recicladosballester.com/bidon-plastico-nuevo/>

El diseño del reactor, fue basado en el modelo propuesto por Kalamdhad y Kumar (2013)¹⁷⁵; Fernandez.,et al., (2012)¹⁷⁶ y Kalamdhad y Kazmi (2009)¹⁷⁷, quienes realizaron compostaje de lodos residuales en un tambor rotatorio de pequeña escala, y demostraron este sistema como una alternativa eficiente, presentando una estabilización muy cercana a la ideal, en un periodo más corto, al facilitar acciones como el volteo de la mezcla, la aireación y la conservación de la humedad y la temperatura. En la imagen 13 se observó la fisonomía del tambor rotatorio, construido y empleado en la presente investigación.

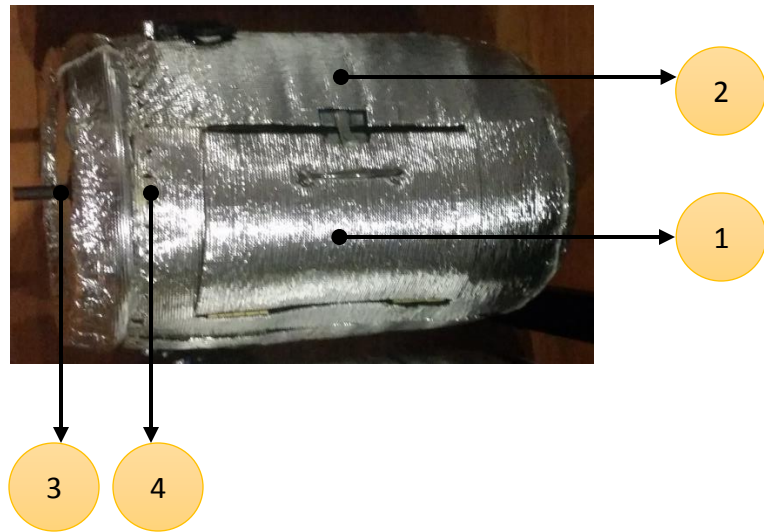
¹⁷⁵ KALAMDHAD, A., SINGH, K. Op. Cit. p. 59-69.

¹⁷⁶ FERNÁNDEZ, F., SÁNCHEZ, V., RODRIGUEZ, L., VILLASEÑOR, J. Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste winery waste in a rotatory drum reactor. Waste Management 30. 2012. p. 1948-1956.

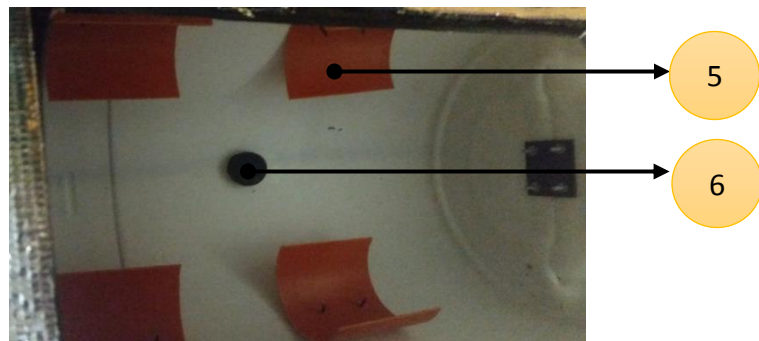
¹⁷⁷ KALAMDHAD, A., KAZMI, A., SINGH, K. Maturation of primary stabilized compost from rotary drum. Resource, conservation and recycling 53. 2009. p. 386-392.

Imagen 13. Partes del tambor rotatorio.

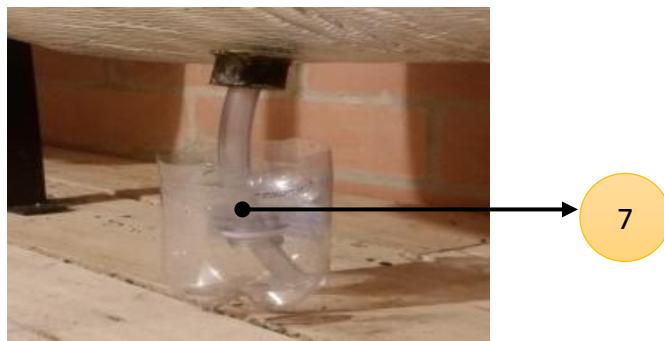
(a) parte superior



(b) Parte interna



(c) Parte inferior



Fuente. Elaboración propia.

En el cuadro 4, se especifican las partes del reactor horizontal y su correspondiente descripción.

Cuadro 4. Descripción de las partes que conforman el reactor horizontal.

Ítem	Parte	Descripción
1	Ventana carga y descarga material	Apertura en la mitad del cilindro de tamaño de una hoja carta (21,59 cm x 27,94 cm), con accesorios que permiten el movimiento de abrir y cerrar de la ventana: dos bisagras y un pestillo. Para permitir un mejor cierre de la ventana, es bordeada con tiras de caucho. La constituye una manija para permitir el agarre y apertura de la ventana ¹⁷⁸ .
2	Cubierta de aislante polietileno	El exterior del cilindro, incluyendo tapas y ventana, es cubierto con aislante de polietileno negro de 5 mm de espesor y con cara metalizada en aluminio ¹⁷⁹ .
3	Eje rotación	En el centro de cada lado, se encuentran puestas dos platinas, una interna y otra externa (anclada a tubo en acero galvanizado de 10 centímetros) que son ajustadas con tornillos, actuando como eje de volteo.
4	Orificios de aireación	Perforaciones de ¼ de pulgada, en todo el contorno superior del cilindro para permitir la aireación hacia dentro del contenedor ¹⁸⁰ .
5	Orificio salida de lixiviados	Abertura en el cilindro, de 3 centímetros de diámetro en el lado opuesto a la ventana que permite la disposición de un tapón que permite cubrirlo al requerir volteo.
6	Aspas	En el interior del contenedor son instaladas 4 aspas en tubo de PVC reciclado de 12 centímetros de largo y 10 centímetros de ancho. Puestas en el lado opuesto a la ventana, en un arreglo de dos en cada lado ¹⁸¹ .
7	Recolección de lixiviados	Se instala en el tapón una manguera de centímetro y medio de diámetro, que confluye a un recipiente plástico donde serán recogidos los lixiviados.

Fuente. Elaboración propia.

¹⁷⁸ KALAMDHAD, A., KAZMI, A., SINGH, K. Op.Cit. p. 386

¹⁷⁹ KALAMDHAD, A., SINGH, K. Op. Cit. p. 59-61.

¹⁸⁰ FERNÁNDEZ, F., SÁNCHEZ, V., RODRIGUEZ, L., VILLASEÑOR, J. Op.Cit. p. 1948.

¹⁸¹ KALAMDHAD, A., SINGH, K. Op. Cit. p. 59-61.

3.2.2.1 Acondicionamiento del lugar de trabajo. El desarrollo del experimento se realizó en un espacio protegido de las adversidades del cambio climático, en el municipio de Sopó, contiguo al lugar de recepción de materias primas para el proceso de compostaje.

3.3 MONITOREO DEL COMPOSTAJE EN TAMBOR ROTATORIO

El compostaje en el tambor rotatorio se llevó a cabo durante 40 días, empezando el 6 de Octubre y finalizando el 14 de Noviembre; lo que resulta extenso para haberse llevado a cabo en reactor, el cual considera un tiempo de 20 a 30 días¹⁸²; Este tiempo se prolongó al tratar de activar el sistema con la adición de melaza, para que se llevara una mejor biodegradación de materiales iniciales. Dentro de este tiempo, se monitoreó y llevó registro de variables de seguimiento.

3.3.1 Protocolo de medición de variables. Se tomaron y registraron diariamente mediciones de pH y temperatura a profundidades de 15, 20 y 30 centímetros en 3 puntos diferentes del reactor. Éstas se llevaron a cabo en el lugar de experimentación (in-situ); y semanalmente, se hallaron los parámetros de contenido de Humedad y de cenizas, mediante toma de muestreo, determinadas en laboratorios de la institución educativa (ex-situ).

En el Anexo C. Se detallan mediante diagramas de flujo, los protocolos realizados para las mediciones de cada parámetro de seguimiento.

De igual manera, se realizaron volteos periódicos al compost, siguiendo lo recomendado por Kalamdhad., et al. (2009)¹⁸³, de no realizar volteos excesivos (mayor a tres veces diarios), puesto que dificulta la conservación de la temperatura, especialmente en la fase termófila. Kalamdhad, en su investigación obtuvo mejores resultados en cuanto a la estabilización de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del compostaje, al encontrar las características ideales para la aireación, siendo el rango más apropiado para la rotación del tambor de tres vueltas cada 24 horas.

3.3.2 Seguimiento de variables in-situ del proceso. Se realizaron las mediciones de parámetros de temperatura, pH, humedad y cenizas.

- **Temperatura:** la medición de la temperatura se realizó una vez al día a la misma hora, antes de someter los reactores a volteo, de esta manera se evitaron

¹⁸² ROCA FERNÁNDEZ, Ana Isabel. Agricultura ecológica. Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegond.

¹⁸³ KALAMDHAD, Ajay S. Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves. 2009

errores por la disipación de calor. Se llevó a cabo con un termómetro digital portátil de 225 mm con punzón sonda en acero inoxidable (Anexo B), cuyo rango de medición es de -50 a 300 °C, con una resolución digital de 0,1°. Se realizó medición en tres puntos a lo largo de cada reactor, equidistantes entre sí por 15 cm y a diferentes profundidades, de 15 cm, 20 cm y 30 cm.

- **pH:** el pH fue monitoreado con tiras indicadoras de pH (Anexo B) diariamente y con potenciómetro de marca Oakton (Anexo B) semanalmente. El procedimiento para la medición de pH consistió en realizar un extracto de muestra de 5 gramos de composta, que fue obtenida de 3 puntos diferentes de cada reactor después de cada volteo, y luego saturarla con 25 mL de agua desionizada en un vaso de plástico y de esta manera se obtuvo una proporción de 1:5 g/mL como propone Niwagaba, C., et al. (2009)¹⁸⁴, posteriormente se agitó hasta lograr homogenización. Se lavó bien el electrodo de manera previa y subsecuente a cada medición para evitar dispersiones en las medidas.

3.3.3 Seguimiento variables ex-situ del proceso. Las mediciones de humedad y cenizas, se realizaron una vez a la semana. Se toman pequeñas porciones de diferentes puntos, hasta obtener una muestra de 30 gramos, siguiendo protocolo de muestreo, descrito en el capítulo 2 (muestreo de lodos). El protocolo de medición se basó en la NTC 1495¹⁸⁵ para determinación de humedad, y en la NTC 1886¹⁸⁶ para determinación de cenizas, métodos descritos anteriormente en el capítulo 1 (Aspectos técnicos y científicos).

3.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

3.4.1 Resultados de mediciones variables de seguimiento. Se obtuvo el comportamiento de los parámetros de temperatura pH, humedad y cenizas.

- **Temperatura:** este parámetro es importante, debido a que ayuda a determinar en qué etapa se encuentra el proceso: mesófila I, termófila, mesófila II, o maduración. Además de esto, contribuye en la inhibición del crecimiento de microorganismos patógenos con el incremento de temperatura (fase termófila), sin alterar las características del producto final (abono orgánico).

Se observó un comportamiento de variación de temperatura similar en los tres reactores, siendo evidente que en los extremos de los reactores y a menores profundidades se obtuvieron las temperaturas más bajas, y en el centro y a

¹⁸⁴ NIWAGABA, C., et al. Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. En: Waste management. February, 2009. vol. 29, no. 2, p. 585-589.

¹⁸⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 1495. Op. Cit. p.6.

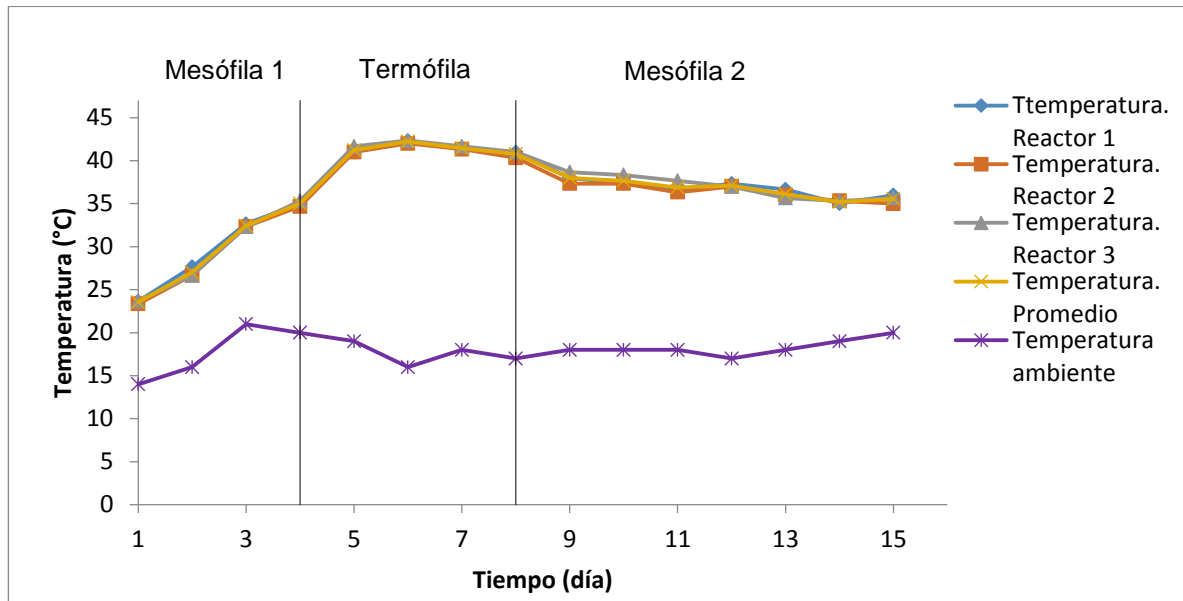
¹⁸⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 1886. Op.Cit. .p.7.

mayor profundidad, las temperaturas más altas. A partir del día 15 no se registraron mediciones de temperatura a profundidad de 15 cm, debido a que la altura del material en proceso de compostaje descendió, como efecto de la biodegradación.

A continuación, se observan gráficas de perfiles de temperatura a las diferentes profundidades (15 cm, 20 cm y 30 cm) en cada reactor, para la realización de un análisis más profundo.

En cada gráfica se contempla una línea morada correspondiente a la temperatura ambiente, como referencia para indicar que el material ha llegado a la etapa de maduración, de igual manera, se encuentra una línea verde, que indica el promedio de temperaturas para los reactores.

Gráfica 1. Perfil de temperaturas en los reactores a profundidad de 15 cm.



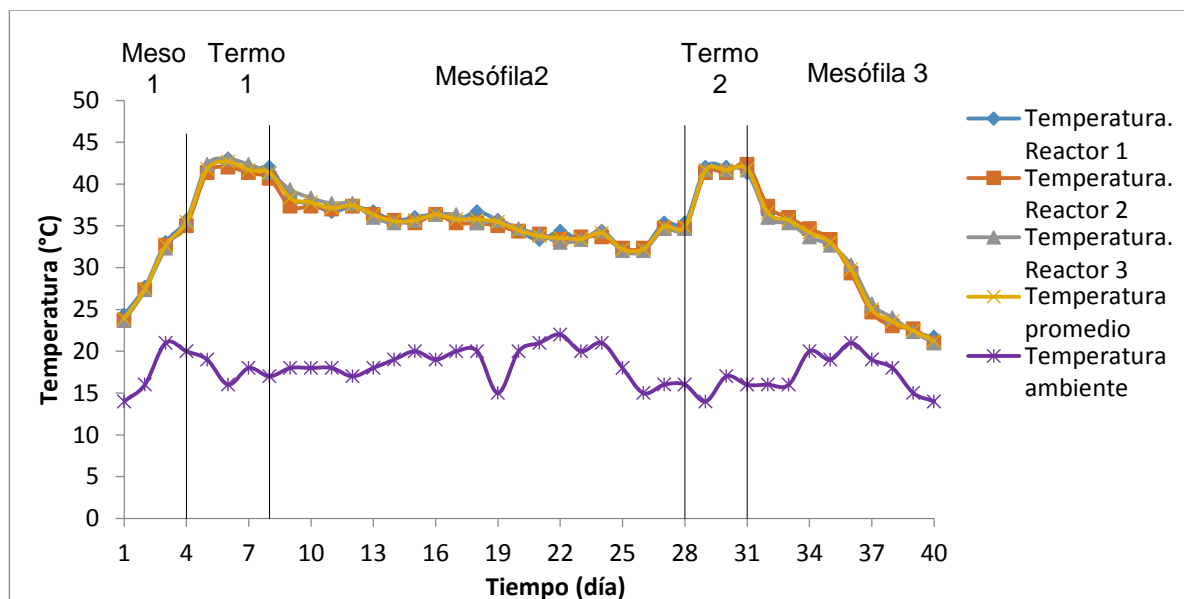
Fuente. Elaboración propia.

Al inicio del proceso, en el momento de mezclar los materiales y disponerlos en los reactores, se registró una temperatura promedio de 24°C, siendo ésta superior a la del ambiente (14 °C), éste hecho se deriva de la alta humedad de la mezcla de materiales al inicio del proceso de compostaje y por el comienzo de la actividad microbiana.

En la gráfica 1, se observó que en los 6 primeros días hubo un ascenso de temperatura como consecuencia de la acción de las bacterias mesófilas, las cuales inician el proceso de degradación de los elementos más biodegradables,

alcanzando así una temperatura promedio de 35,44°C, lo cual corresponde a la etapa mesófila 1. Subsiguientemente se presentó la etapa termófila, intensificándose la actividad microbiana de bacterias y aumentando la temperatura del reactor, donde se alcanzó una temperatura máxima promedio de 41,87 en un periodo de 4 días. En esta segunda fase, se tuvo que llegar a temperaturas superiores, de 55-60°C¹⁸⁷, para garantizar un buen proceso de sanitización y eliminación de microorganismos patógenos. Este incremento de temperatura no se logró debido a la compactación del material, lo cual hizo que la porosidad disminuyera, y ocasionara que el oxígeno necesario para las reacciones aerobias de compostaje se desplazara a través de espacios intersticiales más pequeños debido a la mayor proximidad de las pequeñas partículas sólidas, lo que limitó la circulación de oxígeno y provocó zonas anaerobias¹⁸⁸. A partir del día 9, tuvo de nuevo lugar las temperaturas mesófilas, y se empezó a notar una disminución de volumen de material, que está asociado a pérdida de humedad y a la biodegradación de los materiales.

Gráfica 2. Perfil de temperaturas en los reactores a la profundidad de 20 cm.

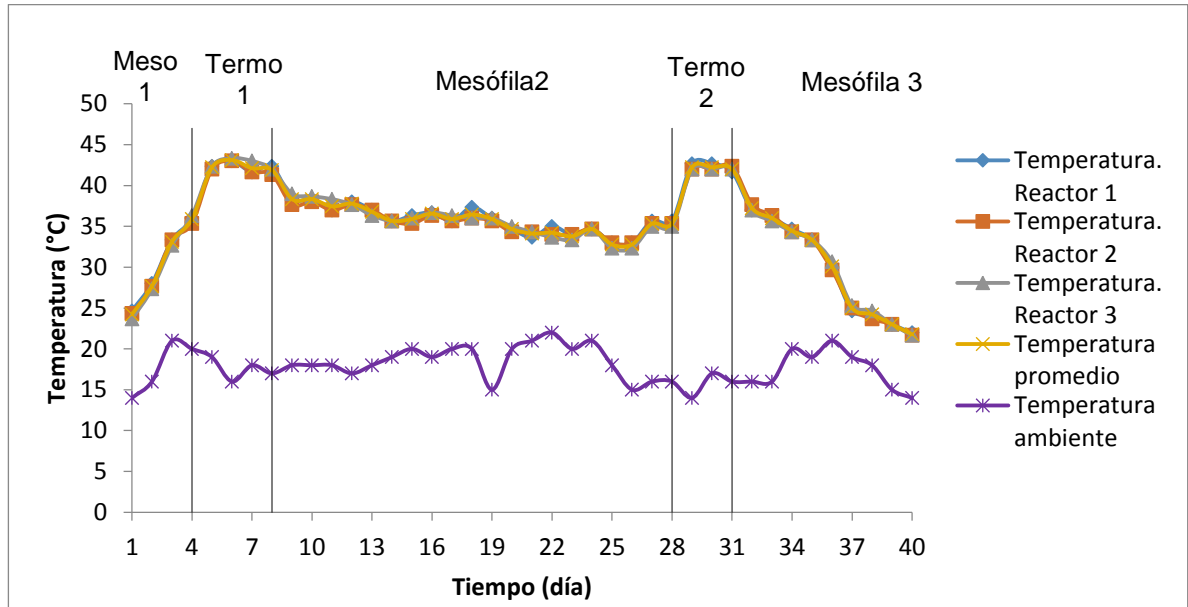


Fuente. Elaboración propia.

¹⁸⁷ KUTER, Geoffrey., H.A, Hoitink., R.A, Rossman. Effects of Aeration and Temperature on Composting of Municipal Sludge in a Full-Scale Vessel System. 1985.

¹⁸⁸ NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. Chapter 2. Composting. 2000.

Gráfica 3. Perfil de temperaturas en los reactores a la profundidad de 30 cm.



Fuente. Elaboración propia.

Las gráficas 2 y 3 mostraron el comportamiento de medición a las profundidades de 20 cm y 30 respectivamente de los 3 reactores. A la profundidad de 20 cm, se logró una temperatura máxima promedio de 41,86 °C y a profundidad de 30cm, una temperatura de 42,33 °C, las cuales tienen duración de 4 días, confirmando de esta forma la no sanitización y eliminación de los microorganismos patógenos ($T < 60$ °C). A partir del día 20, predominó un olor característico del amoníaco, lo que pudo estar asociado a un exceso de nitrógeno, a raíz de esto, se tomó la decisión de aplicar melaza diluida en agua en proporción 1:1¹⁸⁹, una sola vez, con la finalidad de activar el proceso y así poder alcanzar mejores niveles de temperatura, siendo éste un material con alto contenido de azúcares (aporta carbono), que actúa como acelerador de descomposición de la materia orgánica. La melaza se aplicó en cada reactor el día 27 de llevarse el proceso de compostaje, favoreciendo la multiplicación de la actividad microbiológica, lo cual se reflejó en el incremento de temperatura a los 3 días de su aplicación, sin embargo no se alcanzaron temperaturas muy altas, siendo la máxima promedio de 41,92 °C durante 2 días, y a partir del día 32 se observó la disminución de la temperatura por el descenso de la actividad microbiana, debido al agotamiento de

¹⁸⁹ SANCLEMENTE REYES, Óscar Eduardo., GARCÍA ARBOLEDA, Mauricio, VALENCIA TRUJILLO, Francis Liliana. Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 2011. p.3.

carbohidratos que componían el material¹⁹⁰. La temperatura descendió hasta llegar a temperaturas alrededor de 21 °C, cercanas a la temperatura medio ambiente (15 °C), lo que indicó la fase final (de enfriamiento) del compostaje. Al mantenerse el proceso de compostaje en su mayor parte en condiciones mesófilas, se esperó un incremento de microorganismos y en consecuencia una mayor degradación de los compuestos. Sin embargo, al finalizar el proceso de compostaje, es evidente pequeñas partículas de papel periódico, lo que indicó que no se obtuvo una buena degradación de éste, la posible explicación a tal fenómeno se puede dar a que en este residuo priman la celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes muy complejos de degradar¹⁹¹.

- **pH:** es un buen indicador de la evolución del proceso de degradación en el compostaje, durante las primeras etapas del proceso, el pH sufrió un descenso (alrededor de 5,0), debido a que los microorganismos actuaron sobre la materia orgánica más lábil, que produjo una liberación de ácidos orgánicos y dióxido de carbono; los ácidos sirven como sustratos para futuras poblaciones microbianas. Posteriormente tuvo lugar una subida del pH como consecuencia de un aumento en la concentración del ión amonio¹⁹². Conviene tener presente que un elevado aumento del pH, acompañado de fuertes subidas de temperatura, puede suponer la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco. Conforme se estabiliza el material, los valores de pH suelen situarse entre 7 y 9 como consecuencia de la liberación de CO₂, y la producción de amoníaco de la degradación de las proteínas¹⁹³.

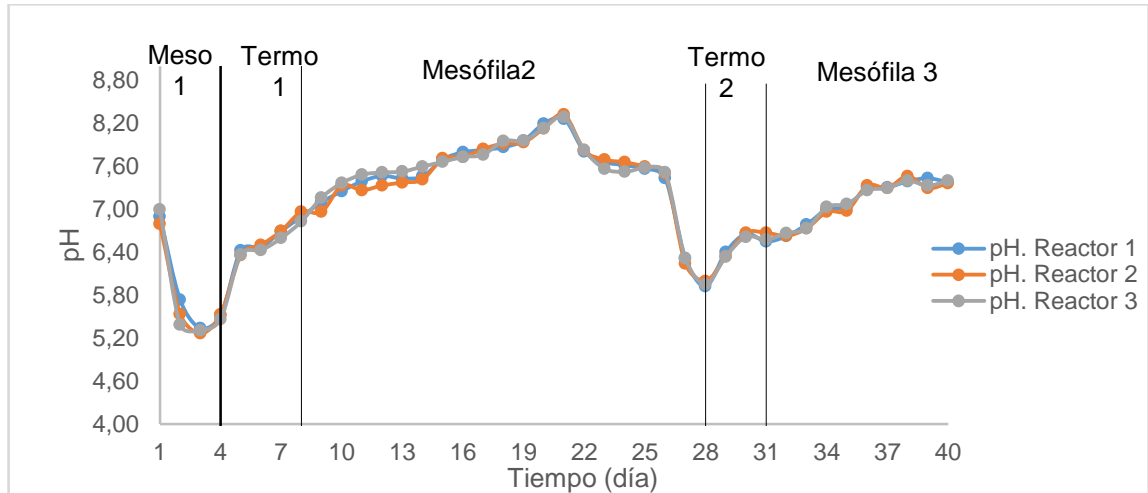
¹⁹⁰ PACHÓN, Magda Estefanía., VARGAS, Anlle Daniela. revisión sobre el estudio de la dinámica de los microorganismos presentes en el compostaje de subproductos de la caña de azúcar. Risaralda. 2015.

¹⁹¹ FOGARTY., KELLY. Microbial enzymes and biotechnology.1990.

¹⁹² CARNES, R. Y LOSSIN, R. An investigation of the pH characteristics of compost. Compost Sci. 5.1970.

¹⁹³ SÁNCHEZ MONEDERO, M.A., ROIG A. PAREDES, C., BERNAL, MP. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures.2001.

Gráfica 4. Evolución del parámetro de pH en cada reactor.



Fuente. Elaboración propia.

La gráfica 4 mostró el comportamiento de pH para los tres reactores durante el proceso de compostaje. En el inicio del proceso, los reactores se encontraron en un pH cercano al neutro, debido a los aportes de las materias primas, en las cuales prevalecieron pH cercanos a 7, como se observó anteriormente en la caracterización de éstas. En los primeros 3 días del proceso de compostaje, el pH disminuyó en los tres reactores, alcanzado un valor mínimo promedio de 5,36, esta disminución se debió a la actividad de los microorganismos sobre la materia orgánica, liberando ácidos orgánicos¹⁹⁴. Luego del decrecimiento del pH al inicio del proceso, éste empezó a incrementarse hasta llegar a un medio alcalino, teniendo lugar en fases mesófilas y termófila, obteniéndose un máximo valor de pH en el día 21, correspondiente a un promedio de 8,30 en etapa mesófila. Éste comportamiento se dio por la rapidez de descomposición de compuestos nitrogenados por parte de los microorganismos, en donde se logró percibir el olor característico del amoníaco durante este proceso biodegradativo. El día 27, el pH empezó a disminuir debido a la incorporación de melaza, la cual tiene un pH ligeramente ácido (pH=6), seguido a esto, ocurrió de nuevo un incremento de pH, en esta vez llegando a la fase termófila proporcionada por la acción de la melaza en la actividad microbiológica. En la última fase, el pH tendió a estabilizarse en un valor neutro debido a la formación de compuestos húmicos. El trabajo realizado por Suler et al (1977)¹⁹⁵ relaciona el comportamiento del pH con la aireación del sistema para residuos sólidos orgánicos, concluyendo que productos finales con

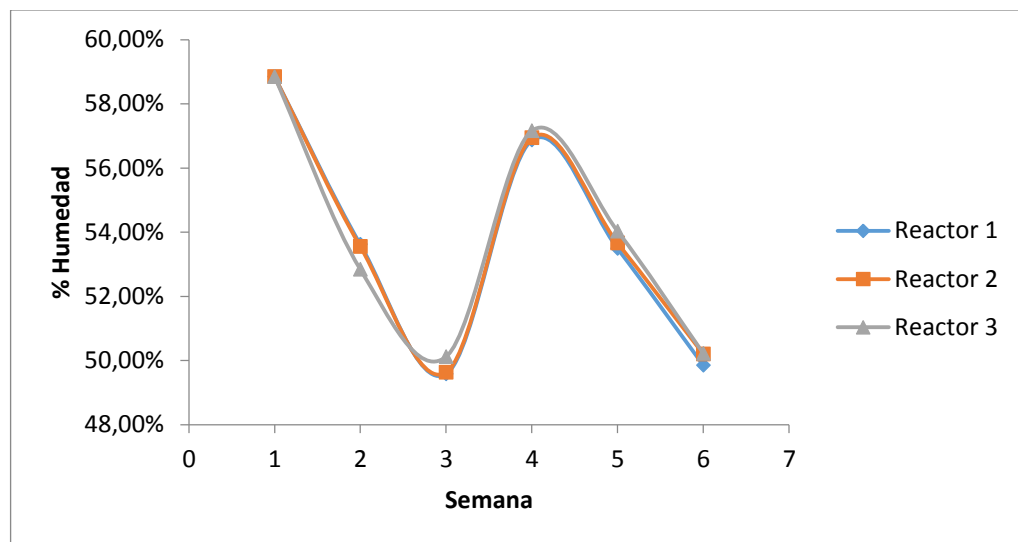
¹⁹⁴ SUNDBERG, Cecilia. Food waste composting-effect of heat, acids and size. Licentiate Thesis. Swedish University of Agricultural sciences. Department of Agricultural Engineering. 2013. p. 38.

¹⁹⁵ SULER, D.J. y FINSTEIN, S. Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. Appl. Environ. Microbiol, 33 (2). 1977. 345-350 p., p. 341.

un pH entre 7 y 8 indican una aireación adecuada y un producto final maduro. Además, establecieron que la degradación orgánica se inhibe cuando se mantiene pH menor a 7. De estas observaciones, se pudo concluir que la aireación durante el proceso fue la adecuada, obteniendo un producto final con un pH dentro del rango establecido por los autores; sin embargo, puesto que fue difícil la descomposición del papel periódico, en el producto final, se presentaron pequeños trozos de papel. El pH del producto final se encuentra dentro del rango exigido por la NTC 5167¹⁹⁶.

- **Humedad:** parámetro relacionado con los microorganismos dado que utilizan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular¹⁹⁷. La mezcla al inicio del proceso de compostaje presentó una humedad del 58,85%, la cual resulta adecuada para cumplir con lo descrito anteriormente. En la gráfica 5, se pudo observar el comportamiento de contenido de humedad en los 3 reactores, el cual fue similar entre éstos.

Gráfica 5. Comportamiento de la humedad durante el tiempo de compostaje.



Fuente. Elaboración propia.

La humedad es un factor limitante del proceso de compostaje, si ésta desciende por debajo del 40%, la actividad microbiana es más lenta, mientras que si excede

¹⁹⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMATIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167.Opt.cit.

¹⁹⁷ SANABRIA ORTIZ, Natalia., SEGURA AMADOR, Yessica Andrea. Propuesta de producción de abono orgánico mediante un proceso de compostaje con los residuos sólidos orgánicos del municipio de Silvania. Universidad de América. Bogotá, 2010.

el 65% se dificulta la circulación de aire a través de la masa¹⁹⁸. Varios autores recomiendan como valores convenientes para el rango de humedad desde 40 hasta 60%¹⁹⁹. En el seguimiento de medición de humedad en esta experimentación, en los 3 reactores se observó una leve decadencia de la humedad inicial de 58,85% a un 49,78% en la tercera semana del proceso, manteniéndose siempre dentro del rango adecuado, facilitando el transporte de nutrientes hacia los microorganismos, esto debido a que al inicio del proceso, se mezclaron materiales secos con el lodo que se encontraba húmedo (66%), y de esta manera se logró controlar la humedad excesiva y la presencia de líquidos lixiviados en el proceso de compostaje. El no generar lixiviados en el proceso de esta experimentación, correspondió también a la estructura del material, al ser de alta densidad y tender a compactación, se dificultó la circulación del agua por efecto de gravedad y la existencia de fuerzas de cohesión entre ésta y las partículas del compost²⁰⁰.

En la semana 4, se observó un crecimiento en el contenido de humedad, esto aconteció por la adición de melaza diluida en agua, lo cual humedeció el material que se encuentra en proceso de compostaje. Seguidamente, se observó un decrecimiento en el contenido de humedad nuevamente, a lo que se concluyó que la humedad se notó favorecida con la aplicación del sistema de tambor rotatorio y con la frecuencia de volteo, pues facilitó la conservación de líquidos. Al final del proceso de compostaje se obtuvo una humedad promedio en los 3 reactores de 50,09%, lo que indicó la necesidad de implementar un sistema de secado, debido a que la humedad exigida para abonos orgánicos según la NTC5167²⁰¹ debe encontrarse entre 20 y 35%. Para ello, se realizó un sistema de secado que ha sido utilizado con éxito en los suelos agrícolas para la desinfección y secado, este método es conocido mundialmente como solarización, el cual aprovecha la energía solar mediante la utilización de plásticos especiales. Ésta es una tecnología ecológica y económica y que protege el material a secar de las lluvias y demás sustancias.

El secador solar consistió de una estructura en madera en un arreglo rectangular, cubierta por un plástico de polietileno con aditivo anti-UV, conocido como cubierta agrofilm (ver imagen 14) donde se conservó el material compostado durante 5 días hasta obtener el porcentaje de humedad que exige la normatividad para abonos orgánicos. Por otro lado, no se logró la sanitización de microorganismos

¹⁹⁸ DOMÍNGUEZ, J., ELVIRA, C., SAMPEDRO, L. A. Effects of bulking agents in composting of pig slurries. *The science of composting*, 1996.p.1146-1149.

¹⁹⁹ Chiumenti, A. *Modern Composting Technologies*. Reciclaje y tratamiento biológico de los residuos sólidos Municipales. Quito, Ecuador: Editorial Ecuador. 2005.

²⁰⁰ KHAN ACADEMY. Cohesión, adhesión y tensión superficial del agua y cómo se relacionan con la formación de puentes de hidrógeno.

²⁰¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167.Op. cit.

patógenos, debido a que no se alcanzaron altas temperaturas, la máxima fue de 40 °C, esto debido al clima que se presentó en la Sabana Cundinamarca durante estos días (alrededor de 14 °C) y el poco material a secar.

Imagen 14. Secador solar con cubierta de plástico.



Fuente. GASTRONOMÍA SOLAR.
<https://gastronomiasolar.com/deshidratador-solar-secado-alimentos/>

- **Cenizas:** parámetro de medida que indica el porcentaje de la materia seca que permanece como materia orgánica tras el proceso de compostaje, es decir, a través de éste, se conoce el comportamiento de biodegradación durante el proceso de compostaje, y es considerado como el principal factor para determinar la calidad agronómica del compost.

Durante el compostaje, la materia orgánica tendió a descender debido a su mineralización por parte de los microorganismos y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico²⁰².

La velocidad de transformación de materia orgánica depende de su naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y de las condiciones fisico-químicas del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH)²⁰³

²⁰² BARRERO, Isabel Cristina. Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en un Vertisol de Valle del Cauca. Palmira, Colombia. 2016.

²⁰³ MORENO, J., MORAL, R., GRACÍA MORALES, J.L., PASCUAL, J.A., BERNAL, M.P. Op.Cit.

La biodegradabilidad de un proceso de compostaje se puede estimar por medio de un balance de material, en el que la cantidad de cenizas se mantiene constante durante el proceso. Este balance se expresa por medio de un coeficiente de biodegradabilidad (K_b)²⁰⁴ a partir de la concentración de cenizas al inicio y al final del compostaje.

$$K_b = \frac{[(C_f - C_i) * 100]}{[C_f * (100 - C_i)]}$$

Donde C_i y C_f son el porcentaje de cenizas al inicio y al final del compostaje respectivamente.

En la tabla 9 se muestra el coeficiente de biodegradabilidad (K_b) obtenido en cada reactor.

Tabla 9. Coeficientes de biodegradabilidad (K_b) para cada reactor.

Reactor	C_i	C_f	% K_b
1	21,52	54,73	77,32
2	21,52	54,88	77,46
3	21,52	55,01	77,57

Fuente. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 9, los 3 reactores tuvieron un promedio de biodegradabilidad del 77,45%, lo cual indicó que la mayor parte de materia orgánica fue degradada. Éste porcentaje de biodegradabilidad reveló la falta de degradación del material de compostaje, y se corroboró al observar algunas partículas de papel en el producto final. De acuerdo con los valores de cenizas finales en los 3 reactores, fue evidente que se encuentran dentro del valor requerido según la norma NTC 5167²⁰⁵, la cual exige un porcentaje menor al 60 % para abonos orgánicos.

- **Sólidos volátiles:** los sólidos volátiles son los compuestos perdidos durante el proceso de calcinación (550 °C) del material en proceso de compostaje. La composición de las sustancias emitidas puede variar de un lugar a otro, del tipo de residuo tratado, del estado de descomposición y de las condiciones de operación del proceso²⁰⁶. La producción de compuestos volátiles se debe a la aireación incompleta o insuficiente durante el proceso de compostaje y que esto

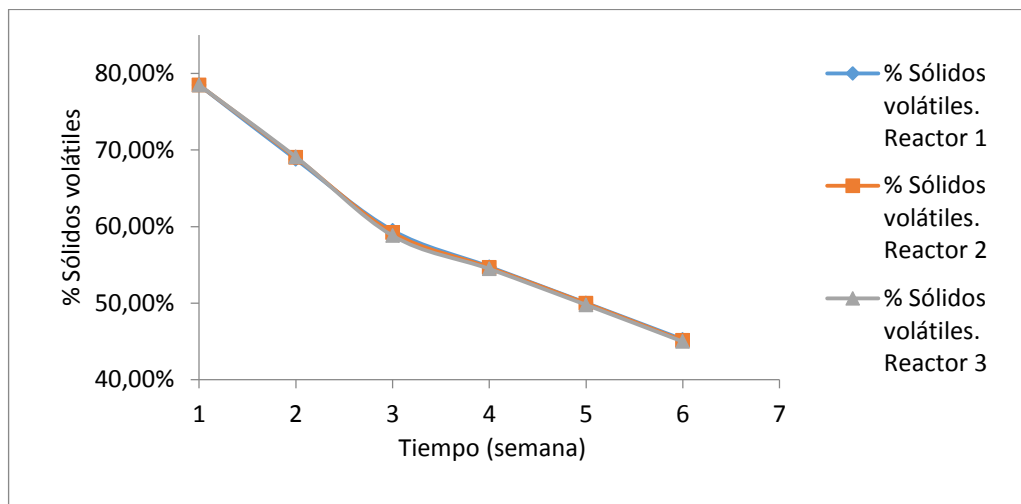
²⁰⁴ HAUG, R.T. Op. Cit. p.752.

²⁰⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167.Op. cit.

²⁰⁶ P. Bruno., M. Caselli., G. Gennaro, G. d., M. Solito., M. Tutino. Monitoring of odor compounds produce by solid waste treatment plants with diffusive samplers. Waste Management . 2007.p. 539 - 544.

lleva a la producción de compuestos de sulfuro, la emisión de alcoholes, cetonas, esterres y ácidos orgánicos²⁰⁷

Gráfica 6. Comportamiento de sólidos volátiles durante el proceso de compostaje.



Fuente. Elaboración propia.

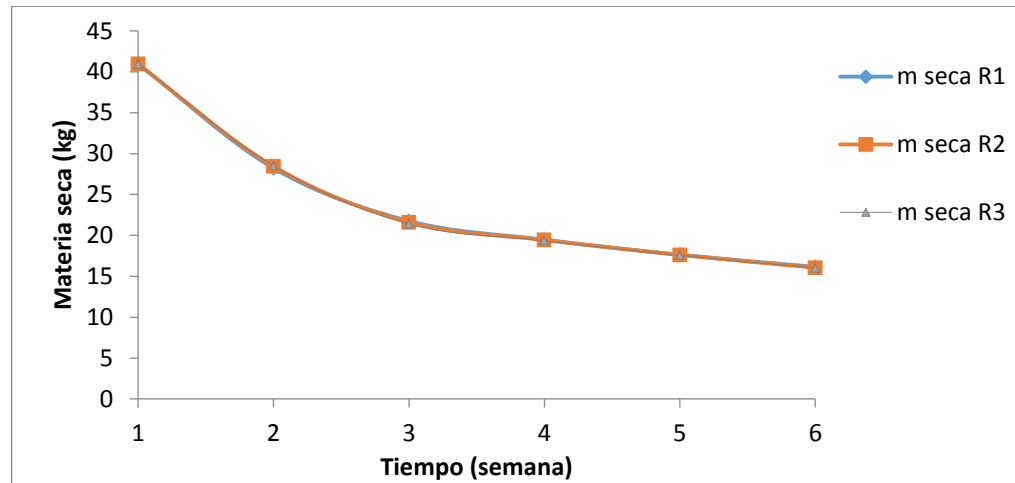
De acuerdo con la Gráfica 6 se observó un decrecimiento continuo de sólidos volátiles, lo cual estuvo relacionado con la biodegradación presentada por parte del proceso. Se notó que la mayor pérdida de sólidos volátiles ocurrió al inicio del proceso de compostaje, donde se produjo una pronta mineralización de la fracción orgánica, este comportamiento indica la bioxidación de los compuestos más biodisponibles para los microorganismos. De igual manera se observó una leve disminución de la degradación a partir de la tercera semana, lo cual al parecer indicó el agotamiento de materiales de carbono simple, quedando compuestos con estructuras más complejas (componentes del papel periódico) y de difícil transformación²⁰⁸. Por último, es probable que la cantidad de sólidos volátiles siga disminuyendo en caso de que se quisiera aumentar el tiempo de retención en los reactores.

En la gráfica 7 se presenta el comportamiento de materia seca en masa (kg) a través del proceso de compostaje en los tres reactores, llevándose a cabo un comportamiento muy similar en todos los reactores.

²⁰⁷ PAGANS, E., FONT, X., & SÁNCHEZ, A. Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. *Journal of Hazardous Materials*. 2006.p.179-186.

²⁰⁸ ARIAS ISAZA, G.C., PÉREZ MÉNDEZ, M.A., LAINES, J.R., CASTAÑÓN, G. Comparison of two ventilation techniques in the decomposition of organic matter. México. 2009.

Gráfica 7. Cantidad de materia seca en el proceso de compostaje.



Fuente. Elaboración propia.

En relación con el comportamiento de la materia seca en masa (kg) a través del proceso de compostaje, se observó que al principio de dicho proceso, se inicia con una materia seca promedio de 40, 937 kg, la cual empezó a descender con mayor notoriedad en las primeras semanas del proceso (1-3 semana), esto correspondió a las mayores pérdidas por volatilización de materia orgánica en fases iniciales del compostaje, lo cual fue consistente al proceso, dado que en las primeras semanas se logró una mayor biodegradación del material. Para el reactor 1 la materia seca al final del proceso fue de 16,16 kg, donde se percibió una disminución de materia del 60,53 % con respecto a la cantidad inicial, en el reactor 2, al final del proceso, la materia seca fue de 16,05, con una disminución de materia del 60,78% y el reactor 3 finalizó el proceso con 16,07 kg (60,73 %), los cuales presentaron menores desviaciones entre sí. Se debe precisar que para estos cálculos las cenizas totales (en masa seca) del proceso son constantes debido a que éstas no se volatilizan, y que la materia seca fue calculada con la siguiente expresión:

$$\text{materia seca} = \frac{\text{Contenido de cenizas}}{\% \text{ cenizas}}$$

El comportamiento de la materia seca permitió determinar si el compostaje obtenido es maduro o si, por el contrario, faltó biodegradación, fue evidente en la gráfica 6, que se podía seguir degradando el material compostado, por el proceder de masa de materia seca que se observó al final de la curva, donde no se notó una estabilización, aunque si un comportamiento con tendencia muy próxima a ésta, lo que indicó que el proceso de degradación sería completo en un corto tiempo. Para que los efectos de la aplicación del compost sean positivos, éste debe ser lo suficientemente "maduro", es decir, estable, de lo contrario la materia

orgánica poco estabilizada seguirá el proceso de descomposición en el suelo pudiendo provocar problemas²⁰⁹.

3.5 RENDIMIENTO ABONO/MATERIA PRIMA

Para conocer el rendimiento de cada uno de los reactores, se pesó el contenido de material en uno de ellos después de los 40 días (tiempo que duró el proceso compostaje), En la imagen 15 se observó el producto final empacado en bolsa ziploc, después de secado y tamizado.

Imagen 15. Producto final empacado.



Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 10, se presentaron los rendimientos para cada tratamiento considerando la cantidad inicial de los materiales en cada reactor. De acuerdo con los resultados de la tabla 10, se consideró el mejor rendimiento para el reactor 1, seguido del reactor 2 y 3; y se obtuvo en los tres reactores un rendimiento similar. Sin embargo los rendimientos del compost obtenido con respecto a la materia prima, se estimaron un poco bajos. Las cantidades de material tomadas para muestreo fueron de 1,170 kg para los tres reactores, siendo éstas muy pequeñas y despreciables al momento de realizar los cálculos para determinar rendimientos.

²⁰⁹ VICENTE, J., CARRASCO, J.E., NEGRO, M.G. El compostaje como tecnología para el tratamiento de residuos: Compostaje de bagazo de sorgo dulce con diferentes fuentes nitrogenadas. 1996. p. 12.

Tabla 10. Rendimiento abono/materia prima de los reactores.

Reactor	Cantidad material inicial (kg)	Cantidad compost final (kg)	Cantidad papel no biodegradado (kg)	Rendimiento (%)	Rendimiento promedio (%)
1	41,18	17,376	0,8688	40,08	39,35
2	41,18	16,980	0,6792	39,58	
3	41,18	16,472	0,6589	38,40	

Fuente. Elaboración propia.

El rendimiento obtenido en cada reactor es lo que generalmente se consigue en procesos de compostaje, lo normal es de 1:3 – 1:4²¹⁰, lo que quiere decir, que se obtiene un tercio o un cuarto de la cantidad de materia que se puso en los reactores. Esto indica que se llevó a cabo una buena transformación de materiales iniciales en producto a pesar de no completarse la biodegradación del papel periódico.

3.6 BENEFICIOS AMBIENTALES

Los rellenos sanitarios constituyen una fuente importante de biogás, resultado del proceso de descomposición biológica de residuos sólidos de origen orgánico, conformado por metano (CH₄) y Dióxido de carbono (CO₂) y fracciones de sólidos volátiles²¹¹. Se estima un aproximado del 47,5% de los gases que se producen en un relleno sanitario correspondan a metano y el 30% a dióxido de carbono²¹², éstos son considerados como gases de efecto invernadero (GEI) según lo emitido por la EPA (Environmental Protection Agency)²¹³. De acuerdo con esta organización, se ha estimado un índice llamado como potencial de calentamiento global (GWP), desarrollado para permitir comparaciones de los impactos del calentamiento global de diferentes gases, específicamente es una medida de cuánta energía absorberán las emisiones de una tonelada de un gas durante un periodo de tiempo determinado, en relación con las emisiones de una tonelada de dióxido de carbono. Para 20 años, el índice de GWP del metano es 72, lo que

²¹⁰ INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA AGRARIA Y ALIMENTARIA. [EN LÍNEA]: <http://www.inia.es/saportal/guest/guest>.

²¹¹ CAMARGO, Y., VÉLEZ, A. Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Barranquilla, Colombia. 24 y 25 de septiembre de 2009. p. 1.

²¹² *ibid.*, p. 3.

²¹³ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Greenhouse gas emission: Methane Emissions. p.1.

indica que durante este periodo de tiempo, el metano contribuye al efecto invernadero 72 veces más (en cantidades másicas) que el dióxido de carbono²¹⁴.

La estimación de la cantidad de dióxido de carbono emitido en el proceso de compostaje (considerando que en el compostaje aerobio no se liberan gases como metano (CH₄), idealmente el material orgánico se convierte en agua, CO₂ y humus)²¹⁵, se realizó a fin de compararla con la cantidad de dióxido de carbono y metano emitidos a la atmósfera si se disponen los residuos en un relleno sanitario. La Emisión de dióxido de carbono se determina de la siguiente manera:

1. Se estimó el factor de emisión de dióxido de carbono según actividad (compostaje y disposición en relleno sanitario), lo cual se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Factor de emisión de dióxido de carbono según actividad.

Material	Factor de emisión (kg CO ₂ -e/ Ton)	
	Compostaje	Relleno Sanitario
Podas	57	365
Papel periódico	1,8	11,6
Lodos	30	210

Fuente. DEPARTMENT OF ENVIROMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS (DEFRA), 2010.

2. Seguido a esto, el factor de emisión (FE) se multiplicó por la cantidad de material empleado (BT), para obtener la emisión de CO₂ a la atmósfera²¹⁶.

$$BT * FE = E$$

En la tabla 12 se presentan los resultados de la estimación de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂-e) según actividad.

²¹⁴ GLOBAL WARMING FORECAST. Methane and carbon dioxide global warming potential. [En línea] United States, 2018., p.1 . Disponible en <http://www.global-warming-forecasts.com/methane-carbon-dioxide.php>.

²¹⁵ MINISTERIO DE AGRICULTURA. SERVICIO AGRÍCOLA GANADERO. Agricultura orgánica nacional. Bases técnicas y situación actual. Chile. 156 p., p. 49.

²¹⁶ DEPARTMENT OF ENVIROMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS (DEFRA), 2010.

Tabla 12. Resultados de estimación de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂-e) según actividad.

Material	Dióxido de carbono equivalente (kg CO ₂ -e)	
	Compostaje	Relleno Sanitario
Podas	0,45	2,93
Papel periódico	0,41	2,67
Lodos	0,99	6,92

Fuente. DEPARTMENT OF ENVIROMENT, FOOD AND RURALAFFAIRS (DEFRA), 2010

Como se observó en la Tabla 12, se presenta una menor emisión de dióxido de carbono en procesos de compostaje comparado con su disposición en un relleno sanitario, y teniendo en cuenta el índice GWI que presenta la relación de 72:1 (CH₄:CO₂) para el lodo residual, en una duración de 20 años del gas en la atmósfera, se logra establecer que por cada 6,92 kg CO₂ emitidos equivalen al efecto invernadero que ocasionan 498,24 kg de CH₄. Con base en ello se puede afirmar que las cantidades de gases que son emitidas en un proceso de compostaje, tienen menor impacto sobre el efecto invernadero al compararlo con las cantidades generadas cuando se disponen los residuos en un relleno sanitario.

3.4.2 Análisis de la composición del compost obtenido. De acuerdo con la evaluación de variables de seguimiento realizada, el contenido de los tres reactores tuvo resultados similares. Se realiza un muestreo de alícuotas de cada reactor y este producto se somete a unos análisis en las instalaciones del centro de biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano para determinar sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

A continuación, en la tabla 13 se muestran los resultados de los parámetros reportados por el centro de biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, junto a los requisitos que deben cumplir los productos orgánicos usados como abonos, según la NTC 5167²¹⁷.

²¹⁷ Ibid., p. 2.

Tabla 13. Resultados de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del compost en base húmeda.

Análisis fisicoquímico			
Parámetro	Unidad	Resultado	NTC 5167
pH	-logH+	7,4	4>9
Humedad	%	35,66	20-35
Cenizas	%	55,66	≤ 60
Capacidad de intercambio catiónico	Cmol(+)Kg(meq/100g)	37,25	≥30
Densidad aparente	g/cm3	0,5	Máximo 0,6
Materia orgánica	%	28,53	≥25
Nitrógeno total	%	1,35	Declararlo si es mayor del 1%
Carbono orgánico	%	13,15	≥15
Relación C/N	P:P	9,73	Declararla
Fósforo	%	0,3	Declararlo si es mayor del 1%
Potasio	%	0,8	Declararlo si es mayor del 1%
Análisis microbiológico			
Coliformes totales	UFC/g	>100010 ⁴	7 x 10 ³
Coliformes fecales	UFC/g	5 x 10 ⁵	7 x 10 ³
<i>E.Coli</i>	UFC/g	1,1 x 10 ⁵	Ausente
Microorganismos mesófilos aerobios	UFC/g	9,8 x 10 ⁵	-

Fuente. Elaboración propia, basado en resultados de Centro de Biosistemas Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Los resultados de la caracterización del compost realizados en el Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, muestran un primer factor muy importante en el proceso de compostaje:

- **Humedad:** la humedad permite la movilidad de los microorganismos, el transporte de nutrientes y el flujo de oxígeno para mantener las condiciones aerobias²¹⁸, en la tabla 13 se muestra un contenido humedad (35,55%) muy próximo al máximo permisible según la NTC 5167²¹⁹.
- **pH:** en cuanto al pH obtenido en el compost, siendo éste de 7,4, cumple con el límite establecido por la norma NTC 5167²²⁰. Este compost obtenido es favorable en aplicación a suelos ácidos, lo que es una consecuencia al continuo uso de fertilizantes que dejan residuos ácidos como por ejemplo urea, nitrato de amonio y sulfato de amonio (SAM) que transforman su nitrógeno en forma amoniacal (NH₄⁺) en la cual se oxida nitrificando y a la vez liberando hidrogeno (H⁺) lo que acidifica al suelo²²¹; sin embargo, resultaría conveniente agregar un compuesto alcalino (Cal), para elevar el pH, y de esta manera actuar como correctivo para neutralizar la acidez de los suelos, además de eliminar los agentes patógenos que están presentes en el compost obtenido.
- **Densidad:** la densidad del material está estrechamente relacionado con la retención de agua y el tamaño de partícula por lo que a medida que avanza el proceso el tamaño disminuyó y por ende la densidad aumentó²²². En esta experimentación, al tener al inicio materiales como el lodo, que es de textura que se compacta por ser limoarcillosa, tiene densidades altas, que con el proceso de compostaje se dispersa generando densidades más bajas, aunque esto se debe principalmente a que el producto final fue sometido a proceso de secado y tamizado, lo cual al mostrarse seco, su peso es menor y por ende su densidad disminuye. Se observa que el abono orgánico obtenido contiene una densidad apropiada (0,5 g/cm³), cumple con la NTC 5167²²³ puesto que este parámetro debe ser un máximo de 0,6 g/cm³.
- **Capacidad de intercambio catiónico:** su determinación en un abono orgánico no tiene solamente interés por el valor agronómico que representa este parámetro, es decir, estima la potenciabilidad en la retención de 15 nutrientes y capacidad de inmovilización de sustancias fitotóxicas, así como la posibilidad de

²¹⁸ Kulikowska, D. y Z. Gusiatin. Sewage sludge composting in a two-stage system: Carbon and nitrogen transformations and potential ecological risk assessment. Waste Manag. 38.2015.

²¹⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMATIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167. Opt. Cit.

²²⁰ Ibid.

²²¹ INSTITUTO COLOMBIANO Y AGROPECUARIO (ICA); MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Acondicionadores y mejoradores de suelos. p. 22

²²² MARTÍNEZ, María M.; PANTOJA., ROMÁN, Pilar. Op.Cit.

²²³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMATIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167. Opt. Cit.

amortiguar cambios súbitos de pH, sino que utilizando adecuadamente puede informar de la estabilidad de la materia orgánica de dicho compost. Diversos estudios realizados con abonos orgánicos y compost de diversos residuos orgánicos han demostrado que la CIC aumenta a medida que también aumenta el grado de estabilidad de la materia orgánica (Harada and Inoko, 1980a, 1980b, 1981). En el abono orgánico obtenido se encontró una capacidad de intercambio catiónico que cumple con la NTC 5167, siendo éste de 37,25 Cmol(+)/Kg(meq/100g).

- **Materia orgánica:** el contenido de la materia orgánica es un parámetro fundamental para definir la calidad del compost. En el progreso del compostaje, el contenido de materia orgánica disminuyó debido a su mineralización y a la pérdida de carbono en forma de dióxido de carbono²²⁴. El porcentaje de materia orgánica obtenida en el abono orgánico, es de 28,53%, (mayor de 25%) según lo exigido por la NTC 5167²²⁵.
- **Carbono orgánico:** el carbono es un compuesto que interviene en la disminución de la tasa de erosión y mantiene la actividad de los microorganismos al ser fuente de energía para estos. De acuerdo con la normatividad NTC 5167²²⁶, el contenido en carbono en el abono orgánico es de 13,15%, lo cual no cumple con lo exigido en dicha normatividad. Sin embargo, el contenido de carbono se encontró 1,85 puntos por debajo del mínimo requerido.
- **Relación C/N:** la norma NTC 5167²²⁷, no exige un valor o un rango específico para este parámetro. No obstante, varios autores recomiendan que el rango ideal de compost maduro tenga una relación C/N entre 10 y 15²²⁸, en la tabla 13, se observó que el abono orgánico tiene una relación C/N de 9,73; 0,27 por debajo de lo recomendado. El valor de relación C/N al final del proceso de compostaje fue menor que al inicio, lo cual es normal en proceso de compostaje, debido a la mineralización del nitrógeno y el consumo de carbono por parte de los microorganismos en la transformación de la materia orgánica.
- **Nitrógeno:** es un macronutriente que instituye en la síntesis de proteínas, componente importante en el crecimiento de las plantas, generando mayor producción de frutos o flores. El contenido de este componente en el abono orgánico fue de (1,35%), mayor del que se tenía al inicio del compostaje (0,78%), indicando una mineralización de éste en el proceso de compostaje.

²²⁴ CAMPITELLI, Paola, et al. Compostaje. Obtención de abonos de calidad para plantas. Argentina. Editorial Brujas, 2014. P. 37

²²⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMATIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167.Opt.Cit.

²²⁶ Ibid.

²²⁷ Ibid.

²²⁸ MARTÍNEZ, Op. cit. p. 31.

- **Fósforo:** macroelemento esencial que interviene en numerosos procesos bioquímicos a nivel celular donde contribuye en la transferencia de energía lo cual lo hace importante en el proceso de fotosíntesis de las plantas y además permite que las plantas tengan una mayor resistencia a bajas temperaturas. El abono orgánico obtenido presentó una cantidad baja (0,30%), pero dentro del rango establecido por la norma, la cual exige hasta un valor máximo corresponde a 1%²²⁹, esto se debe a que este nutriente depende de variables como materia orgánica y pH dado que la primera al paso del tiempo se descompuso liberando ácidos grasos que solubilizan el fósforo y el pH permitiendo que algunos elementos como hierro y aluminio se neutralizaran generando la movilización de este elemento²³⁰.
- **Potasio:** componente fundamental en la activación de varias enzimas involucradas en procesos metabólicos como la síntesis de proteínas y carbohidratos²³¹. De acuerdo con el valor obtenido en el abono orgánico, se encontró dentro de lo establecido por la NTC 5157²³², sin embargo al querer obtenerse un fertilizante organicomíneral, se agregó cierta cantidad en peso de este componente, mejorando las condiciones exigidas.
- **Microorganismos patógenos:** la determinación de presencia de microorganismos patógenos es uno de los factores más relevantes en el momento de estimar la calidad del abono orgánico, puesto que al aplicar compost sin tratar o tratado inadecuadamente representa un peligro para el medio ambiente y para la salud pública, debido al movimiento y supervivencia en el suelo de bacterias patógenas presentes en estos biofertilizantes tales como: *Salmonella sp*, *Shigella*, *Campylobacter*, *Vibrio cholerae*, *E. coli*²³³. En la Tabla 14 se mostraron las condiciones de temperatura y tiempo requerido para lograr la destrucción de los microorganismos más relevantes en el proceso de compostaje.

²²⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167.Opt.Cit.

²³⁰ SANABRIA ORTIZ, Natalia., SEGURA AMADOR, Yessica Andrea. Propuesta de producción de abono orgánico mediante un proceso de compostaje con los residuos sólidos orgánicos del municipio de Silvania. Universidad de América. Bogotá, 2010.

²³¹ BARRERA STERLING, Lina Paola. Estandarización del proceso de compostaje en la obtención de abono orgánico a partir de residuos sólidos orgánicos generado en el municipio de Sibaté. Universidad de América. Bogotá, 2010. Opt. Cit.

²³² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. NTC 5167.Opt.Cit.

²³³ GÓMEZ, Yamiris Teresa., GONZÁLEZ, María Isabel., RUBALCABA, Sergio. Microorganismos presentes en el compost. Importancia de su control sanitario. Cuba. 2004.

Tabla 14. Temperaturas y tiempos de exposición para la destrucción de microorganismos patógenos.

Microorganismo	A		B	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
<i>Salmonella Typhosa</i>	55-60	30	60	20
<i>Salmonella sp</i>	55	60	60	15-20
<i>Shigela sp</i>	55	60		
<i>Entamoeba Histolytica</i>	45	Pocos segundos	55	Pocos segundos
Larvas de <i>Trichinella Spiralis</i>	45	Pocos segundos	55	Pocos segundos
<i>Brucella Abortus</i>	55	60	62-63	3
<i>Escherichia Coli</i>	55	60		15-20
Huevos de <i>Ascaris Lumbricoides</i>	>50	<60		

Fuente. Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n11/n11a03.pdf>.

De acuerdo con las máximas temperaturas que se alcanzaron en el proceso de compostaje, siendo de alrededor de 43°C, no se logró la sanitización del material compostado, por el contrario, se observó, según los resultados de los análisis, que se multiplicaron los microorganismos patógenos, esto ocurrió en su mayor parte por las condiciones de permanencia en el proceso de compostaje, donde se llevaron a cabo temperaturas bajas (mesófilas) a lo largo de todo el proceso, y por valores de pH (5,21- 8,31); condiciones aptas para la reproducción de estos microorganismos²³⁴. Por otro lado, este aumento poblacional microbiano, estuvo relacionado por la adición de melaza, donde se incrementó la actividad microbiana y sin embargo no se alcanzaron temperaturas que permitieran la eliminación de estos microorganismos (ver tabla 14), por el contrario, permitió el desarrollo de más microorganismos patógenos al enriquecer el medio con carbohidratos, aportando energía y manteniendo temperaturas pertenecientes a etapa mesófila.

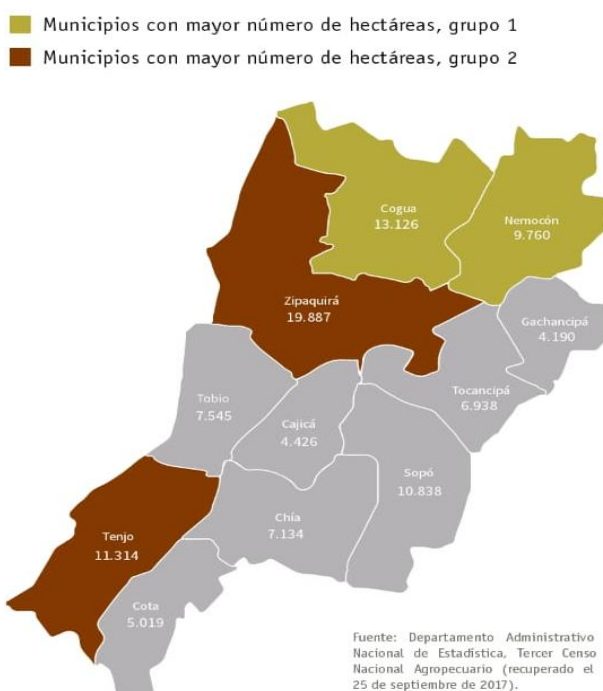
Dicho lo anterior es considerablemente importante antes de utilizar el material seleccionado, realizarle a este los análisis necesarios para asegurarse de que están en apropiadas condiciones y cumple los requerimientos para ser utilizado y que de esta manera no llegue a afectar el proceso o producto final; pues en este caso al ser el agente de carga lodos de PTAR, éste se considera un reservorio de bacterias patógenas.

²³⁴ ELIKA. Fundación vasca para la seguridad agroalimentaria. *Escherichia coli*. Febrero, 2013. [en línea]: http://www.elika.net/datos/pdfs_agrupados/Documento84/3.Ecoli.pdf.

3.5 OBTENCIÓN DEL FERTILIZANTE ORGÁNICO-MINERAL

3.5.1 Escogencia de formulación fertilizante organo-mineral. Con el fin de obtener una composición base de fertilizante organo-mineral enfocado en suelos de la Sabana Centro, Cundinamarca (Cajicá, Chía, Cogua, Cota, Gachancipá, Nemocon, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá), se realizó una revisión de los cultivos predominantes en esta zona y sus requerimientos en composición para su beneficio. Para ello, se recurrió a registros llevados por la Gobernación de Cundinamarca y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural²³⁵

Figura 7. Mapa con mayor número de hectáreas Sabana Centro, 2014.



Fuente. DANE. censo Nacional Agropecuario. 2014.

Según los datos reportados por el Tercer Censo Nacional Agropecuario (DANE, 2014)²³⁶, la provincia Sabana Centro tiene 100.177 hectáreas (4,5% del área total

²³⁵ GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA Y SECRETARIA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Mapa de uso actual y cobertura vegetal de los suelos departamento de Cundinamarca y secretaria de agricultura y desarrollo rural, Bogotá.2015.

²³⁶ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Tercer censo Nacional Agropecuario. Cundinamarca, 2014.

del departamento de Cundinamarca), de las cuales el 61,7% son de tipo agropecuario, 23,4% son bosques y el 14,9% son áreas destinadas a otros usos.

En la tabla 15, se evidenciaron las cifras de la Secretaría de Agricultura de la Gobernación de Cundinamarca en el 2015, donde el principal producto en los municipios de la provincia Sabana Centro es la papa, ocupando el primer lugar en términos de producción en 9 de los 11 municipios que conforman la provincia. Para el municipio de Cogua, este producto aportó el 23% de la producción de la provincia, y Zipaquirá y Tenjo, aportaron el 39% y 26%, respectivamente.

Tabla 15. Principales productos agrícolas producidos en los municipios de Sabana Centro, 2015.

Municipio	Producto	Producción (tonelada)
Cogua	Papa	23.600
	Zanahoria	648
	Fresa	175
Gachancipá	Papa	84
	Fresa	23
	Maíz tradicional	5
Nemocón	Papa	832
	arveja	39
Tabio	Papa	2.392
	Zanahoria	1.633
	Maíz tradicional	451
Cajicá	Lechuga	1.650
	Coliflor	1.288
	Durazno	519
Chía	Papa	2.450
	Acelga	675
	Lechuga	520
Cota	Espinaca	6.624
	Papa	4.636
	Maíz tecnificado	1.740
Sopó	Papa	1.740
	Ajo	715
	Fresa	520
Tenjo	Papa	25.990
	Lechuga	16.100
	Maíz tradicional	5.173
Tocancipá	Papa	540
	Hortalizas varias	294

Tabla 15. (Continuación).

Municipio	Producto	Producción (tonelada)
	Cebolla de bulbo	286
Zipaquirá	Papa	39.600
	Zanahoria	1.850
	Papa criolla	150

Fuente. Secretaría de Agricultura, Gobernación de Cundinamarca (recuperado en noviembre de 2018)

Con relación a la producción de cultivos de flores y follajes, según las estadísticas del DANE, 2014, los municipios de esta provincia aportan una cuarta parte (58.204 toneladas) de la producción total del departamento (229.316 toneladas). Se destacan Tocancipá y Nemocón, con 12.229 y 7.879 toneladas, respectivamente. Esto se observa en la tabla 16.

Tabla 16. Total área cosechada y producción de cultivos de flores y follajes en los municipios de Sabana Centro, 2014.

Municipio	Área cosechada con flores y follaje (hectáreas)	Producción de cultivos de flores y follajes (toneladas)
Cogua	102	2.931
Gachancipá	180	4.986
Nemocón	283	7.879
Tabio	51	1.528
Cajicá	101	2.910
Chía	264	7.751
Cota	112	3.133
Sopó	239	6.383
Tenjo	252	6.449
Tocancipá	422	12.229
Zipaquirá	71	2.025
Total provincia	2.077	58.204
Total Cundinamarca	7.852	229.316

Fuente. Cálculos del observatorio Sabana Centro cómo vamos con base en información del Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Tercer Censo Nacional Agropecuario (recuperado, Noviembre 2018).

En la provincia Sabana Centro predominan las tierras de pastos, cuyo uso principal es el pasto manejado (pastoreo), el cual ocupa una extensión de 51.299 hectáreas que cubren el 61,6% de la provincia, de igual manera se destacan las extensiones de rastrojo (7,6%), bosque plantado (5,8%) y cultivos de papa (4,7%)²³⁷.

Con base a la información anterior, se decidió enfocar el fertilizante organomineral a cultivos de forrajes, siendo éste de mayor extensión de área en la zona de la Sabana Centro. Para ello, se realizó un estudio de los requerimientos nutricionales que demanda este tipo de cultivo, con el fin de obtener una formulación de fertilizante precisa y enfocada para estos suelos de cultivo.

Las características fisicoquímica comunes de los suelos de la Sabana Centro son, su baja fertilidad, destacándose aquellos con pH menores de 5,5, con bajo contenido de fósforo y potasio disponible y alta capacidad de fijación de fosfatos por la presencia de arcillas amorfas. En estos suelos no es posible obtener producciones altas si no se aplican cantidades suficientes de elementos mayores (nitrógeno, fósforo y potasio)²³⁸.

Dentro de las especies forrajeras, se encuentran las familias leguminosas y gramíneas²³⁹, ésta última responde muy bien a la fertilización, en términos de la cantidad de forraje producido por unidad de superficie. El beneficio de la fertilización se mide principalmente por el incremento en la capacidad de carga animal y producción de leche y carne, esta respuesta positiva se debe principalmente al manejo eficiente de nitrógeno, debido a que este componente proporciona la proteína. Por el contrario, una ineficiente aplicación de nitrógeno, puede llevar a una acumulación de nitratos en las plantas, el forraje se vuelve tóxico y puede producir una serie de desórdenes metabólicos, o envenenamiento por ácido cianhídrico, éste se presenta en grandes cantidades después de una helada o de una sequía severa²⁴⁰. La fertilización en general aumenta el contenido de proteína y minerales de los pastos, aumentando, por consiguiente, su valor nutritivo. Para llevar una buena fertilización, es necesario mantener una relación íntima entre el suelo, la planta y el animal²⁴¹.

En cuanto a nutrición mineral, existe un primer grupo de minerales de los cuales el animal tiene un mayor requerimiento que la planta; por lo tanto, ésta no aporta la

²³⁷ GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA Y SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Op.Cit.

²³⁸ RIASCOS GUERRERO, Ricardo. Fertilización de cultivos en clima frío. Monómeros Colombovenezolanos S.A. Universidad Nacional de Colombia. p. 48.

²³⁹ ICA. Pastos y forrajes .Principales pastos de corte.

²⁴⁰ PINEDA,Osmin. El problema delas plantas tóxicas dentro de los potreros. 2017.

²⁴¹ CONFAGAN, FADEGAN, JUNAC. Manual Pastos y Forrajes. 1986. p.235.

cantidad adecuada y hay necesidad de suplementarlos directamente al animal. Entre estos figuran el sodio, cloro, cobalto, yodo, selenio, zinc, cobre y, en casos especiales, el hierro. En el segundo grupo se clasifican algunos elementos que la planta acumula sin perjuicio para su crecimiento y producción, pero pueden ser tóxicos para el ganado, a este grupo pertenecen el molibdeno, el selenio y los nitritos y nitratos. En el tercer grupo se pueden catalogar aquellos elementos que se encuentran en la planta en una concentración similar a las necesidades del animal, cuando se presenta deficiencia de estos elementos, tanto el rendimiento de la planta como el del animal se ven afectados, a este grupo pertenecen el fósforo, el calcio, el magnesio y el azufre²⁴².

Es evidente que la fertilización nitrogenada y, eventualmente, las combinaciones NP, NS, NPK, son fundamentales para mantener altos rendimientos en pasturas mejoradas y debidamente manejadas, ésta práctica es la que se conoce como fertilización de mantenimiento²⁴³. Adicionalmente se ha encontrado que los pastos mejorados requieren una fertilización básica del tipo N - P - K, frecuentemente acompañada de elementos menores y enmiendas, que debe efectuarse durante el establecimiento de la pradera y repetirse eventualmente, dependiendo de la especie y de la evolución de la fertilidad del suelo.

Los pastos necesitan dos tipos de fertilización: fertilización de establecimiento y fertilización de mantenimiento. La fertilización de mantenimiento está encaminada a devolver al suelo los nutrientes extraídos por los pastos, con el objeto de que la producción de forraje no decaiga aceleradamente, y de esta manera se conserve un buen nivel de productividad. El elemento clave en la fertilización de mantenimiento es el nitrógeno, sin embargo, se ha visto que es necesario hacer aplicaciones frecuentes de abono compuesto NPK, adicionando también elementos secundarios y menores que eventualmente alcancen niveles deficitarios²⁴⁴.

A continuación, en las tablas 17 y 18 se mostraron las recomendaciones de nitrógeno, fósforo y potasio para gramíneas y leguminosas forrajeras de clima frío²⁴⁵.

²⁴² Fertilización de pastos mejorados. En: Fertilización de cultivos en clima frío. 2a. Reimpresión. Abonos Nutrimón. 1993. p. 157 - 175.

²⁴³ IZQUIERDO F., P. Efecto de la frecuencia de corte, la fertilización nitrogenada y la densidad de siembra sobre la producción de materia seca del raigrás aubade (*Lolium hybridum*). Tesis de Zootecnista. Bogotá. Universidad Nacional. Facultad de Zootecnia. 1981. p. 105.

²⁴⁴ NOLLER, C.H. y RHYKERD, C.L. Relationship of nitrogen fertilization and chemical composition of forage to animal health and performance. In: Forage Fertilization. American Society of Agronomy. p. 363 - 394.

²⁴⁵ INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). 2003

Tabla 17. Recomendaciones de N, P, K para gramíneas forrajeras clima frío (más de 2000 msnm).

		Potasio cmol(+)/kg								
		Bajo<0,10			Medio 0,11-0,20			Alto >0,2		
		N	P2O5	K2O	N	P2O5	K2O	N	P2O5	K2O
Fósforo (mg/Kg)	Bajo <5	200	80	40	200	80	20	200	80	0
	Medio 6-10	200	40	40	200	40	20	200	40	0
	Alto>10	200	20	40	200	20	20	200	20	2

*N, P2O5, K2O: kg/ha/año

Fuente. IPNI, 2003.

Tabla 18. Recomendaciones de N, P, K para leguminosas forrajeras clima frío (más de 2000 msnm).

		Potasio cmol(+)/kg								
		Bajo<0,15			Medio 0,16-0,30			Alto >0,3		
		N	P2O5	K2O	N	P2O5	K2O	N	P2O5	K2O
Fósforo (mg/kg)	Bajo <5	40	100	100	40	100	70	40	100	40
	Medio 6-10	40	70	100	40	70	70	40	70	40
	Alto>10	40	50	70	40	50	70	40	50	40

*N, P2O5, K2O: kg/ha/año

Fuente. IPNI, 2003.

Debido a que las gramíneas forrajeras requieren de mayor fertilización²⁴⁶, se resolvió desarrollar una formulación apta para ésta, según los requerimientos y las recomendaciones en cuanto a composición NPK.

De acuerdo con las recomendaciones descritas en la tabla 18, teniendo en cuenta que los suelos de la Sabana Centro presentan cantidades bajas de fósforo y potasio, el requerimiento por componente es de 200, 80, 40 kg/hectárea para nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente, lo que refiere a una proporción 5:2:1.

3.5.2 Selección fuentes de enriquecimiento N, P, K. De acuerdo con los requerimientos en N, P y K para praderas y forrajes, se realizó una proposición de posibles fuentes de enriquecimiento del fertilizante orgánico en cuanto a nutrientes, las cuales están definidas de acuerdo con lo establecido en la Norma

²⁴⁶ Ibid.

Técnica Colombiana NTC 1927²⁴⁷, donde se establecen aquellas fuentes aprobadas por el ICONTEC para enriquecer fertilizantes y acondicionadores de suelo.

Tabla 19. Fuentes de enriquecimiento N, P, K, más utilizadas en fertilizantes de forraje.

Nutriente	Fuente de enriquecimiento	Composición	Características
Nitrógeno	Urea	Contenido de Nitrógeno: 46%	Fertilizante nitrogenado sólido ampliamente utilizado, comúnmente encontrada en la naturaleza, se expulsa en la orina de los animales, el alto contenido de nitrógeno hace que sea eficiente al aplicarse al campo. La urea es comúnmente incorporada al suelo o aplicada en la superficie. Tiene una alta solubilidad. Deben evitarse las aplicaciones de urea cuando el fertilizante vaya a permanecer en la superficie del suelo por períodos prolongados de tiempo. Las pérdidas no deseadas de N, también pueden resultar en pérdidas de rendimiento y calidad de cultivo ²⁴⁸
Fósforo	Roca fosfórica	Contenido de P ₂ O ₅ : 20-22% Contenido CaCO ₃ : 30-32%	Mineral obtenido directamente de fuentes naturales. Se utiliza como materia prima en la fabricación de fertilizantes, favoreciendo el nivel fosfórico del suelo, sin embargo, cuando se solubiliza, libera otros componentes presentes en la roca. Posee importantes concentraciones de Óxido de calcio. Su efectividad depende de tamaño de partícula, origen, composición, condiciones del suelo, climáticas, entre otros ²⁴⁹ .
Potasio	Cloruro de potasio	Contenido de K ₂ O: 60 % Contenido de Cl: 45 %	El cloruro de potasio, es la fuente más comúnmente utilizada, debido a su bajo costo y a que incluye mayor cantidad de potasio que otras fuentes 50-52% K y 45-47% Cl. Se disuelve rápidamente en la humedad del suelo. El K ⁺ será retenido en los sitios de intercambio con carga negativa de las arcillas y la materia orgánica del suelo. Por su parte, el Cl ⁻ se moverá rápidamente. ²⁵⁰

Fuente. INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). 2007.

²⁴⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 1927.

²⁴⁸ INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). Opt. Cit. [En línea]. Available: [https://www.ipni.net/publication/nss-s.nsf/0/0FA2E8A5E4F0C56B85257BBA00598776/\\$FILE/NSS-ES-01.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss-s.nsf/0/0FA2E8A5E4F0C56B85257BBA00598776/$FILE/NSS-ES-01.pdf).

²⁴⁹ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Roma, Italia, 2007.

²⁵⁰ INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). Opc.Cit [En línea]: [https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/\\$FILE/NSS-ES-03.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/$FILE/NSS-ES-03.pdf).

3.5.3 Balance de materia para cantidad de minerales requerida. En esta fase, ya establecidas las fuentes de enriquecimiento en (urea, roca fosfórica, cloruro de potasio), se determinó la cantidad que aporta cada componente en N, P y K, para proceder con los cálculos, teniendo en cuenta que la proporción requerida para el cultivo seleccionado.

Tabla 20. Aporte en masa de fuentes de enriquecimiento en elementos N, P, K.

Fuente de enriquecimiento	Masa fuente enriquecimiento (kg)	Aporte en elementos mayores (kg)
Urea	0,06	0,028 Nitrógeno
Roca fosfórica	0,142	0,062 Fósforo
Cloruro de potasio	0,074	0,039 Potasio

Fuente. Elaboración propia.

Los porcentajes de nitrógeno, fósforo y potasio reportados en el abono orgánico obtenido son 1,35%, 0,30% y 0,61%, respectivamente, según caracterización del compost.

Se buscó un aporte importante de abono orgánico y logró obtener una proporción de 5:2:1, correspondiente a nitrógeno, fósforo y potasio en ese orden, según la relación de requerimiento para forrajes en la zona de la Sabana Centro.

Se tomó como base, una preparación de 500 kg, haciendo parte de éste, el 50% en compost en peso. Para ello, se realizó la mezcla mostrada en la tabla 21, para llegar a obtener un fertilizante órgano-mineral con formulación en N, P, K: 15-6-3, cumpliendo la proporción requerida. Este fertilizante obtenido se le otorgó el nombre de Fertisabana 1.

Tabla 21. Masa de mezcla minerales obtenida.

Compuesto	Peso(g)	Aporte mineral N (g)	Aporte mineral P (g)	Aporte mineral K (g)
Compost	500	6,75	1,5	4
Urea	306,96	143,25	-	-
Roca fosfórica	133,98	-	58,5	-
Cloruro de potasio	56,59	-	-	26
Materia inerte	2,47	-	-	-
Total	1000	150	60	30

Fuente. Elaboración propia.

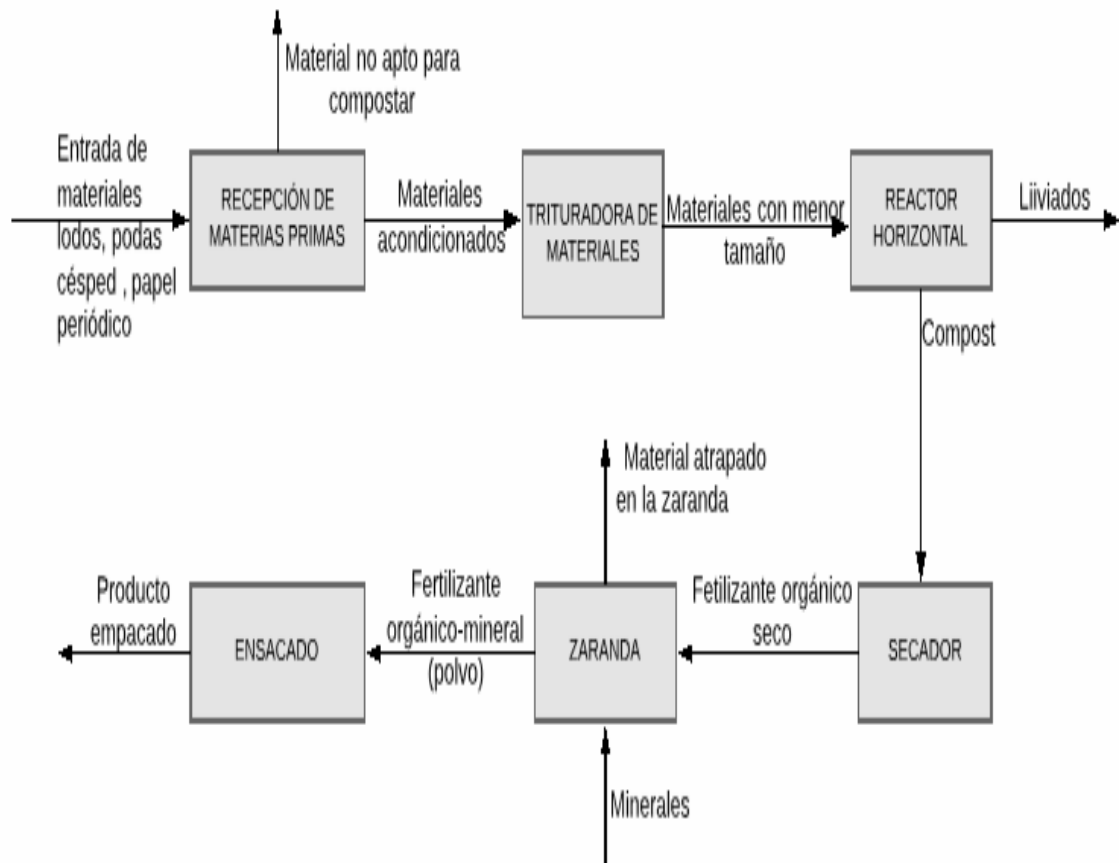
4. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO

En este capítulo, se establecieron las especificaciones técnicas del proceso para la producción del fertilizante organomineral a escala industrial reducida, debido a las pequeñas cantidades de materiales que se emplearán como materia prima.

El proceso abarcó áreas de recepción, reducción de tamaño, mezclado, reacción, secado, tamizado y empaquetado.

A continuación se describió mediante un diagrama de bloques el proceso a seguir, para definir los equipos a emplear en cada etapa de proceso.

Figura 8. Diagrama de bloques del proceso de elaboración del fertilizante organomineral.



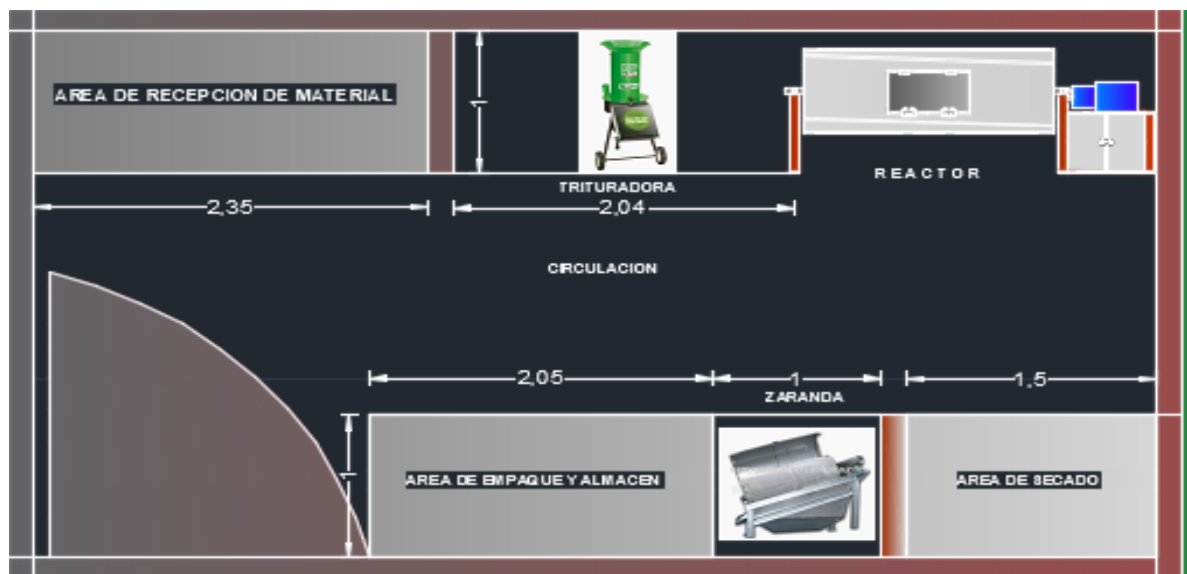
Fuente. Elaboración propia.

Las operaciones unitarias del proceso, se relacionaron con la planificación de la producción, la capacidad, distribución de la planta y la tecnología del proceso. De esta manera, se procedió a determinar los requerimientos de área para la planta de producción del fertilizante.

- **Cantidad aproximada de material (inicial).** Para la determinación de las cantidades de material de ingreso, se partió de la cantidad generada de lodos mensualmente (650 kg), cuyo valor correspondió al 60% de la mezcla. El 40% restante, correspondieron a podas de césped (158,65 kg) y papel periódico (4,54 kg).
- **Densidad del material inicial.** 900,5 kg/m³.

En la figura 10 se observó la distribución por áreas de la planta de producción del fertilizante organicomíneral.

Figura 9. Esquema de distribución áreas de la planta de producción fertilizante.



Fuente. Elaboración propia.

4.1 RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES

Esta etapa engloba todas las operaciones que tienen lugar entre la llegada de los materiales destinados al compostaje y minerales; y el inicio de su pretratamiento. Se llevó un registro de identificación de materiales, incluyendo entradas y salidas de la instalación (día, hora, productor, cantidad, código).

La planta de tratamiento de aguas residuales de Sopó no cuenta con espacio acondicionado para la implementación de unidades de proceso para la producción del fertilizante, es por ello, que se debe realizar la adecuación de un espacio en la PTAR de 28 m².

4.2 ACONDICIONAMIENTO DE MATERIALES (TRITURACIÓN)

Con el fin de disminuir el tamaño de partícula y homogenizar para facilitar los volteos, se requiere una trituradora apta para los materiales iniciales, la cual se describe a continuación.

Tabla 22. Especificación técnica del triturador.

FICHA TÉCNICA: TRITURADOR Y MOLINO ELÉCTRICO DE PASTO, PAPEL Y LODOS	
	<p>Marca: TRAPP Modelo: TR200 Nombre: Trituradora de ramas, troncos y residuos orgánicos. Altura: 0,62 m Profundidad: 0,52 m Peso: 32 kg Frente: 1m Potencia: 1,5 hp Revoluciones: 3600 r.p.m Voltaje: 110 V Capacidad de producción: 300 a 1400 kg/h</p>
	<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Equipado con cuchillas fijadas directo al eje del motor, tolva removible con traba de seguridad. - Equipo para producir abono orgánico, triturar residuos orgánicos, cortar y moler forrajes, cáscaras, césped, hojas, ramas, residuos domésticos, restos de frutas y verduras, café, maderas mohosas, paja hasta de una pulgada de diámetro. Después de triturados, los residuos pueden ser utilizados en la preparación de compuestos orgánicos para fertilización del suelo.

Fuente. TRAPP, 2018.

4.3 FASE DE REACCIÓN

Los materiales triturados se ingresan a un reactor horizontal rotatorio donde ocurre el proceso de compostaje. Para hallar las dimensiones de éste a escala piloto, se tuvo en cuenta el volumen de material a implementar (1,13 m³) y se realizó un escalamiento del reactor utilizado en la experimentación escala laboratorio, teniendo en cuenta de llenar el 80% del reactor para permitir una buena aireación.

El desarrollo de este escalamiento se fundamentó en la revisión teórica de las condiciones termodinámicas que prevalecen en la degradación de la materia orgánica por vía aerobia. Este escalamiento se realizó siguiendo un método físico que parte de los principios de similaridad geométrica basadas en los flujos de disipación y generación de calor, empleado por Behrentz E. y Giraldo E. (1999)²⁵¹

Para hacer posible el escalamiento, fue necesario establecer un criterio para asegurar la representatividad del comportamiento al variar las dimensiones. Se estableció un factor de escalamiento (Bg) el cual es un valor adimensional que debe mantenerse tanto en la escala del modelo de laboratorio como en la escala en el prototipo; se buscó reproducir lo más fielmente posible las condiciones reales de operación en el proceso de compostaje. Se asumió que las condiciones de humedad de laboratorio son iguales a las condiciones del prototipo. Esto se puede hacer debido a que son variables fácilmente controlables sin importar la escala a la que se esté trabajando.

La temperatura es la variable más afectada por la escala debido a que a nivel de laboratorio no se logró de manera natural las mismas temperaturas que se tienen a escala real; ésta condición está ligada a la relación Área/volumen. En la escala de laboratorio se presentó una alta tendencia a la disipación de calor producida por la actividad biológica, contrario a lo que ocurre en condiciones del prototipo a escala real. Por tal motivo se planteó la siguiente analogía:

Ecuación 1. Analogía de la tasa de generación y disipación de calor.

$$\frac{A}{V} = \frac{T_d}{T_g}$$

Donde:

T_d: tasa de disipación de calor (J/s)

T_g: tasa de generación de calor (J/s)

²⁵¹ BEHRENTZ, E. y GIRALDO, E., Modelación a escala del proceso de compostaje aerobio en pila estática con aireación forzada. En: Revista Colombiana De Biotecnología, Colombia. 1999. v.2 fasc.2 p.51 – 59.

Esta relación es válida conceptualmente, debido a que el área superficial es la región espacial por la cual se pierde el calor en un cuerpo cualquiera y por lo tanto la tasa de disipación es proporcional al área superficial²⁵². Del mismo modo el volumen es una medida de la tasa de generación, lo que indica la cantidad de masa reaccionante, y dado que el metabolismo de los microorganismos actuantes en el proceso de biodegradación aerobia es de carácter exotérmico, el volumen es un indicador de la cantidad generada de calor²⁵³. De esta manera se definió el factor (Bg), así:

Ecuación 2. Factor de escalamiento.

$$Bg = \frac{Td}{Tg}$$

Este factor se consideró un número adimensional, el cual debe mantenerse entre el prototipo a escala real y a escala laboratorio para asegurar que la temperatura es similar en los dos sistemas.

Se obtiene la siguiente expresión para la tasa de generación de calor:

Ecuación 3. Tasa de generación de calor.

$$Tg = \varphi W VS$$

Donde:

φ : entalpía de la reacción de degradación (J/mg SVB)

S: concentración del sustrato (mg SVB/L)

Del mismo modo se obtuvo que la tasa de disipación de calor es equivalente al flujo de calor conductivo a través de una superficie.

²⁵² CONESSA, J.A. Mecanismos de transferencia de calor. 2013.

²⁵³ PÉREZ, M.E., MORALES SOSA, M.E. Mecanismos de transferencia de calor que ocurren en tratamiento térmico de alimentos. 2013. p.37-47.

Ecuación 4. Tasa de disipación de calor.

$$T_d = q = -k F \Delta T$$

Donde:

q: flujo de calor conductivo (Energía por unidad de tiempo disipada en forma de calor a través de una superficie con geometría definida y de un material característico).

k: conductividad térmica del material (J/s.cm.°C)

ΔT : diferencial de temperatura entre los puntos de interés (°C).

Remplazando en la ecuación se tiene:

Ecuación 5. Factor de escalamiento de acuerdo con la tasa de generación y disipación de calor.

$$B_g = -k F \Delta T / \varphi k V S$$

A partir de este resultado se determinaron los valores que deben mantenerse para lograr un escalamiento apropiado y representativo por medio de la igualación de los factores de escalamiento para el modelo escala laboratorio y el real:

Ecuación 6. Factor escalamiento prototipo y real.

B_g laboratorio = B_g prototipo a escala real

$$\left(\frac{K_P F_P \Delta T_P}{\varphi_P k_P V_P S_P} \right)_{\text{laboratorio}} = \left(\frac{K_M F_M \Delta T_M}{\varphi_M k_M V_M S_M} \right)_{\text{real}}$$

Si se considera que los valores de entalpia no son función de la escala geométrica y además que las condiciones de temperatura son iguales en el modelo de laboratorio y en el prototipo a escala real, la ecuación se puede simplificar cancelando la tasa de reacción y la concentración del sustrato por tener idéntica magnitud.

Se puede decir que la conductividad eléctrica es también igual en los dos sistemas, pero para lograrlo se hace necesario rodear el material reaccionante con un aislante térmico que la conductividad térmica sea diferente, para este caso se utilizó como aislante térmico polietileno de 5mm de espesor. Finalmente se tiene que:

Ecuación 7. Factor de escalamiento simplificando términos constantes

$$\left(\frac{K_P F_P \Delta T_P}{V_P} \right)_{\text{laboratorio}} = \left(\frac{K_m F_m \Delta T_m}{V_m} \right)_{\text{real}}$$

Para lograr que la ecuación se mantuviera a pesar de los factores tan disimiles en volumen fue necesario que en laboratorio se compensaran estas condiciones, lo que se logró manipulando la conductividad térmica del material que rodea el material reaccionante (k), y el gradiente de temperatura alrededor del material reaccionante.

Se tiene que:

Ecuación 8. Factor de forma.

$$F = \frac{A}{L}$$

Donde:

A: área superficial de la placa a través de la cual se pierde calor.

L: espesor de la lámina.

Para el reactor utilizado en laboratorio que fue una cámara cilíndrica, se obtuvo la siguiente expresión para encontrar el factor geométrico (Holman, 1963)²⁵⁴

Ecuación 9. Factor geométrico cilindro.

$$Fl = \frac{2 * \pi * H}{Ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}$$

²⁵⁴ HOLMAN, Opt. Cit. 1963.

Donde:

Fl: factor geométrico escala laboratorio.

r_i : radio interior del cilindro: 0,17 m

r_o : radio exterior incluida la cubierta térmica: 0,1775 m

H: longitud del cilindro: 0,63 m

Se tiene el factor geométrico para el cilindro escala laboratorio:

Ecuación 10. Factor geométrico cilindro laboratorio.

$$Fl = \frac{2 * \pi * 0,63}{Ln\left(\frac{0,1775}{0,17}\right)} = 91$$

Luego de realizarse un análisis de la situación de escala real y de laboratorio, Behrentz encontró que hay una relación entre el volumen y la geometría de la estructura a modelar y el gradiente de temperatura que se debe mantener para simular las condiciones de escala laboratorio.

Luego de aplicar el despeje de la ecuación 7, se obtuvo la ecuación 11, que permitió la variación de las dimensiones a las que se deseó modelar la unidad real (piloto).

Ecuación 11. Delta de temperatura permisible escala laboratorio.

$$\Delta T_L = \frac{k_P * F_P * \Delta T_P * V_L}{k_L * F_L * V_P}$$

El material aislante utilizado en el laboratorio para compensar la diferencia de relación área volumen entre la escala laboratorio y escala piloto fue la espuma de polietileno, con una conductividad térmica de 0,041 W/mK²⁵⁵, y el volumen reaccionante en la escala laboratorio (llenado 80% capacidad del reactor) fue:

²⁵⁵ THCOAT. Conductividad térmica de materiales para la construcción. 2014.

Ecuación 12. Volumen reaccionante escala laboratorio.

$$Vl = \pi * ri^2 * H * \% \text{ llenado}$$

$$Vl = \pi(0,17)^2 * 0,63 * 0,8$$

$$Vl = 0,045 \text{ m}^3$$

Para la escala prototipo en condiciones reales se requiere que el diferencial de temperatura (ΔT) entre el límite del material de compostaje y la pared interna del reactor sea la menor posible con el objetivo de que la pérdida de calor sea mínima. Se toma un valor de 1°C para la situación crítica en el reactor que es cuando en su interior se alcance la máxima temperatura. El prototipo se construirá en acero inoxidable de 5mm de calibre con conductividad térmica ($k_p = 16,3 \text{ w/m}^\circ\text{K}^{256}$).

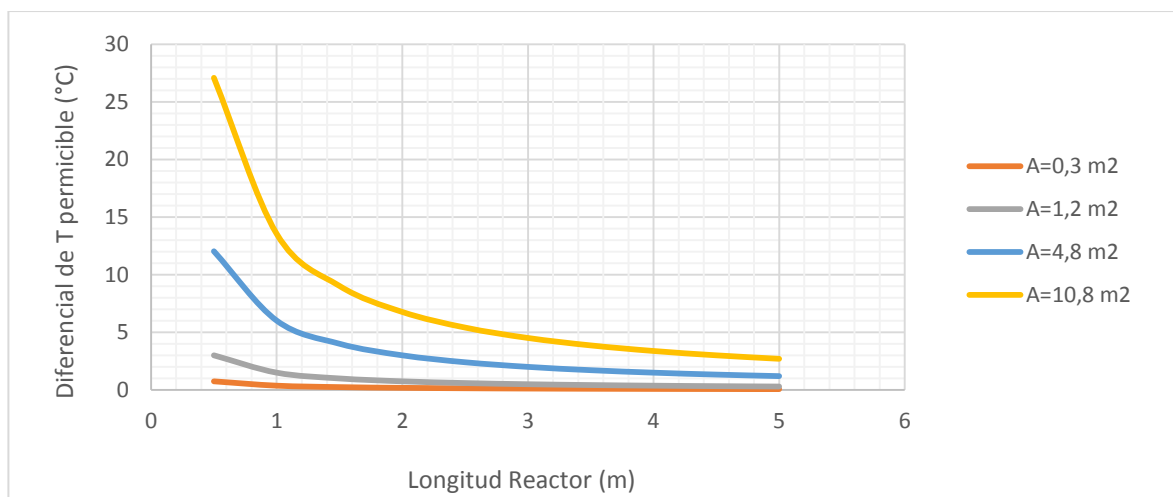
En cuanto al volumen de la planta piloto se puede decir que se tiene una primera aproximación sumando la cantidad de lodo que produce la PTAR en estudio (Ptar del municipio de Sopó), con los materiales estructurantes (Poda de prados del municipio de sopó), y el papel periódico que se utilizó como material que nos garantiza una relación Carbono – Nitrógeno (C/N entre 15 y 30) Adecuada para iniciar el proceso de compostaje. Se tiene: masa Lodo = 650 kg/mes, masa césped = 158,65 kg, masa papel = 4,52 kg; obteniendo una masa total a procesar de 780,75 kg.

Para una densidad media de la masa a procesar de $900,5 \text{ kg/m}^3$ se tuvo un volumen de $0,904 \text{ m}^3$. De material a compostar (V_p). Teniendo en cuenta que en a nivel laboratorio se hizo un llenado del 80% del reactor con el objeto de dejar espacio suficiente para el aireado y la mezcla del material en la planta piloto se manejara el mismo porcentaje de espacio libre, en consecuencia el reactor de la planta piloto será de $1,13 \text{ m}^3$ aproximadamente.

Con ayuda de la gráfica 8, se escogió la dimensión del reactor a escala piloto, teniendo en cuenta que la curva adquiere un comportamiento asintótico a una determinada longitud del reactor propuesto.

²⁵⁶ GOODFELLOW. Conductividad térmica acero inoxidable AISI 304.

Gráfica 8. Relación entre dimensiones escala piloto con respecto al diferencial de temperatura permisible a escala laboratorio.



Fuente. Modelación a escala del proceso de compostaje aerobio en pila estática con aireación forzada. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/30052/30251>.

Al analizar la 8, se obtuvo que para las curvas de áreas 10,8 m² y 4,8 m², la condición asintótica de la curva se consiguió con longitudes de reactor muy altas y el diferencial de temperatura propuesto no se cumple, entonces se descartó inicialmente. Si se toma la curva correspondiente a un área de 0,3 m², se encuentra que la condición asintótica de la curva se consigue a partir de los 0,5 metros y el diferencial de temperatura propuesto también cumple, pero para esta área tan pequeña para albergar el volumen requerido se hace necesario tener una longitud exagerada y por tanto se descarta. En cuanto a la curva correspondiente a un área de 1,2 metros se encontró que la condición asintótica se consigue a partir de los 1,5 metros y además cumple también el diferencial de temperatura propuesta (ver tabla 23), por lo tanto, en este estudio se inclinó por esta última alternativa descrita.

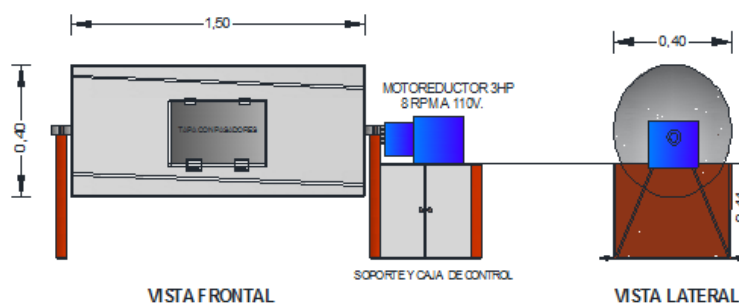
Tabla 23. Diferencial de temperatura acorde a variación de longitud.

Delta T (°C)	Longitud (m)
1,50509	1
1,003394	1,5
0,752545	2
0,602036	2,5
0,501697	3
0,430026	3,5

Fuente. Modelación a escala del proceso de compostaje aerobio en pila estática con aireación forzada. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/30052/30251>

Con respecto a lo anteriormente mencionado, se tienen las especificaciones para el reactor en cuanto a sus dimensiones; área: 1,2 m², longitud: 1,5 m, radio: 0,44m.

Figura 10. Esquema reactor escala piloto.



Fuente. Elaboración propia.

Con respecto al sistema de volteo del reactor, éste girará por medio de una transferencia moto-reductor con potencia de 3 HP para mover la masa contenida y tener 6 revoluciones por minuto. Los cálculos para la potencia requerida son presentados a continuación:

En primera instancia, se estima el peso de la masa contenida que se desea mover (W).

Ecuación 13. Peso de la masa requerida a mover.

$$W = \text{masa (kg)} * \text{gravedad} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$
$$W = 814,05 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 7.977,69 \text{ N}$$

Luego, se determina la velocidad de rotación con base del requerimiento de 6 rpm.

Ecuación 14. Velocidad de rotación.

$$\vartheta = 6 \text{ rpm} * \frac{2 * \pi}{60 \text{ s}} * 0,44 \text{ m} = 0,276 \text{ m/s}$$

Posteriormente, se determinó la potencia necesaria para mover la cantidad de carga a la velocidad especificada anteriormente.

Ecuación 15. Determinación de la potencia motor del reactor.

$$P = F * \vartheta$$
$$P = 7.977,69 \text{ N} * 0,276 \text{ m/s} = 2.205.51 \text{ J/s} = 2,96 \text{ HP} \cong 3 \text{ HP}$$

4.4 SECADO

Al obtenerse el 40% del peso total del material al inicio del compostaje, en forma de abono orgánico, ésta se consideró una cantidad pequeña, que puede ser secada en estructuras donde se aproveche la radiación solar. Una forma muy práctica para utilizar la radiación solar y la energía del aire en el secado del abono orgánico, consiste en un techo plástico transparente y una estructura rustica en PVC de forma parabólica, la cual es construida con el fin de proteger el compost de agentes externos frecuentes como la lluvia.

Cuadro 5. Especificación técnica secador solar parabólico.

FICHA TÉCNICA: SECADOR SOLAR PARABÓLICO	
	Dimensiones: Mide 1,5 m de ancho por 1,8 m de largo por 2 metros de altura Ventanas de ventilación miden 1m de ancho por 1,8 m de alto.
	Características: -Consiste básicamente en una estructura de madera y tubo PVC, piso en cemento, cubierta de nylon para invernadero con protección UV. -La altura de la masa del compost no debe ser mayor a 10 cm. En los lados se construirá una zanja recubierta con cemento para el drenaje del agua de lluvia. -las cortinas son hechas del mismo nylon para cubrirlas.

Fuente. Elaboración propia, basado en CENICAFÉ, 2006.

4.5 FASE TAMIZADO (ZARANDA GIRATORIA)

En esta fase de proceso, se utilizará una zaranda de forma cilíndrica giratoria, en el que ingresará el producto obtenido del compostaje, y los minerales para ser mezclados y filtrar los materiales de mayor diámetro del requerido, y de esta forma obtener un producto con tamaño de partícula uniforme.

Cuadro 6. Ficha técnica de zaranda rotativa.

FICHA TÉCNICA: ZARANDA ROTATIVA PARA COMPOST Y MINERALES	
	<p>Marca: SANYUANTANG Modelo: SYT Nombre: Separador de tamiz rotatorio para compost Potencia: 1,5 kW Capacidad de producción: 0,5-2 T / h Peso: 380 kg Dimensiones: 1080*652*1350 mm</p>
	<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estructura en acero inoxidable - Capacidad de filtrar partículas de < 3 a 10 mm.

Fuente. Elaboración propia, basado en Alibaba, 2018.

4.6 EMPAQUETADO.

El empaquetado del producto final, se realizará de forma manual, empleando sacos de tejido de polipropileno y se empleará cosedora para su cierre, en presentación de 25 kg.

Cuadro 7.Ficha técnica cosedora de sacos.

FICHA TÉCNICA: COSEDORA DE SACOS	
	<p>Marca: Newlong Voltaje: 110 V Velocidad: 1100 rpm Peso de la máquina: 5,5 kg</p>

Fuente. Elaboración propia, basado en Envapack,2018.

5. FACTIBILIDAD FINANCIERA DE LA PRODUCCIÓN DEL FERTILIZANTE

Este capítulo se realizó con la finalidad de estudiar la viabilidad y rentabilidad de la implementación y desarrollo del proceso de producción del fertilizante organico-mineral. Para ello se tuvo en cuenta costos de inversión en máquinas y equipos, costo de producto, precio de venta, mano de obra, adecuación de terreno, costos de materias primas y servicios públicos. Así mismo, se tuvo en cuenta como ahorro, la disposición del lodo en relleno sanitario.

Se realiza un flujo de caja global proyectado a 10 años, con el objeto de determinar los indicadores financieros de valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y relación costo/ beneficio (R B/C).

5.1 INVERSIÓN

Las inversiones iniciales que se tienen en cuenta son: la adecuación de terreno, compra de equipos y maquinaria, contando con la depreciación respectiva.

5.1.1 Adecuación de terreno. De no contar con espacio acondicionado para el funcionamiento del proceso planteado en la PTAR, se hace necesario implementar infraestructura apta para llevar a cabo el proceso de producción de fertilizante.

Tabla 24. Inversión en adecuación de terreno.

Inversión	Área (m²)	Costo (\$ / m²)	Total (\$)
Cementación área total	28	50.000	1.400.000
Techado área total	28,5	20.000	570.000
Adecuación eléctrica	14	3.000	42.000
Mano de obra	28	25.000	700.000

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2 Inversión en equipos y maquinaria. Se deben adquirir equipos y maquinaria para el adecuado funcionamiento de la planta de producción.

- **Costo sistema de calefacción reactor.** Es necesario implementar un sistema de calefacción eficiente, que permita ajustar y controlar la temperatura del reactor, con el fin de obtener una temperatura adecuada para los microorganismos que realizan el tratamiento de compostaje en el reactor, y de ésta manera permitir la sanitación de microorganismos patógenos y una mayor biodegradación del material. Dicho sistema de calefacción, se basa en el implemento de una chaqueta calefactora hecha en espuma de plástico, su costo es de \$10.000.000.

Tabla 25. Maquinaria y equipos necesarios.

Maquinaria y equipo	Cantidad	Costo (\$)	Total (\$)
Trituradora	1	1.199.900	1.199.900
Reactor horizontal + motor + chaqueta de calentamiento	1	48.000.000	48.000.000
Secador solar	1	600.000	600.000
Tamiz rotativo (zaranda)	1	3.177.600	3.177.600
Cosedora de sacos	1	324.500	324.500
Equipo menor (carretillas, palas, báscula, otros)	1	1.400.000	1.400.000
Medidores de variables (T, %H, pH, CO ₂)	1	6.000.000	6.000.000
Inversión total			\$ 60.702.000

Fuente. Elaboración propia.

- **Indicadores para evaluación financiera.** Como anteriormente se ha mencionado, la evaluación financiera se realizó en una proyección de 10 años, correspondientes desde el 2019 al 2028, para esto fue necesario tener en cuenta las variaciones de precios que se pueden presentar en dichos años, de ahí la necesidad de revisar los datos históricos del índice de precio del consumidor (IPC).

Al realizar una revisión Para obtener un valor de IPC, no se encontró relación con los datos históricos reportados debido a que la macroeconomía varía dependiendo del estado económico del país, es por esto que se maneja un IPC para cada año en un porcentaje de 3,6% que está proyectada para el 2019 en la media histórica.

5.2 EGRESOS

Los costos de egresos son la salida de recursos financieros, en este caso, se involucraron gastos en materias primas, que incluyeron los minerales, los demás son residuos generados por el propio municipio, por lo tanto no tiene ningún costo; también se involucraron costos de análisis de muestras. Siendo todos estos costos directos.

Adicional a lo anteriormente mencionado, se generaron costos indirectos, que incluyen los servicios públicos, depreciación y mantenimiento de equipos, implementos de seguridad, mano de obra.

5.2.1 Materias primas.

Tabla 26. Costo de minerales año 2018.

Materia prima (\$ / kg)	Cantidad (kg)	Costo (\$)
Roca fosfórica	8	139.200
Urea	8	200.000
Cloruro de potasio	8	312.000

Fuente. Elaboración propia.

Se proyectaron los costos de minerales para los próximos 10 años

Tabla 27. Costo de minerales durante 10 años.

Año	Minerales		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
0	\$ 200.000,00	\$ 139.200,00	\$ 312.000,00
1	\$ 207.200,00	\$ 144.211,20	\$ 323.232,00
2	\$ 214.659,20	\$ 149.402,80	\$ 334.868,35
3	\$ 222.386,93	\$ 154.781,30	\$ 346.923,61
4	\$ 230.392,86	\$ 160.353,43	\$ 359.412,86
5	\$ 238.687,00	\$ 166.126,15	\$ 372.351,73
6	\$ 247.279,74	\$ 172.106,70	\$ 385.756,39
7	\$ 256.181,81	\$ 178.302,54	\$ 399.643,62
8	\$ 265.404,35	\$ 184.721,43	\$ 414.030,79
9	\$ 274.958,91	\$ 191.371,40	\$ 428.935,90
10	\$ 284.857,43	\$ 198.260,77	\$ 444.377,59

Fuente. Elaboración propia.

5.2.2 Mano de obra. Para la producción de fertilizante organomineral se necesita 1 operario para la recepción de los residuos que entran a la planta, para el pesaje y empaque del producto final, para el traslado del material por medio de carretillas, para llevar el control de insumos y el control de los parámetros que afectan al proceso, quien tendrá un salario equivalente a \$1.000.000; con auxilio de transporte de \$88.211 y todas las prestaciones de ley como son: Pensión 12%, salud 8,5%, cesantías 8,33%, intereses a las cesantías 1%, vacaciones 4,17%, prima de servicios 8,33%, aportes parafiscales 9%, riesgos profesionales (riego II: 1,044 y dotación aproximada 5%²⁵⁷.

²⁵⁷ BANCO DE LA REPÚBLICA. Colombia, 2018. Disponible en: <https://www.larepublica.co/finanzas/el-abc-de-las-prestaciones-sociales-y-los-aportes-parafiscales-2249321>

Tabla 28. Costos nómina año 0.

Costo mano de obra Operario		
Concepto	Valor (\$ / mes)	Valor anual (\$)
Salario básico	1.000.000	12.000.000
Auxilio de transportes	88.211	1.058.532
Pensión	120.000	1.440.000
Salud	85.000	1.020.000
Cesantías	83.333,33	1.000.000
Interés cesantías	10.000	120.000
Vacaciones	41.700	500.400
Prima de servicios	83.333,33	1.000.000
Parafiscales	90.000	1.080.000
Riesgos profesionales	5.220	62.640
Dotación (cada 4 meses)	50.000	150.000
Total	1.656.731	19.880.772

Fuente. Elaboración propia.

Para el salario del operador se realizó un promedio con base a los incrementos de salario mínimo realizados durante los últimos 10 años (2009- 7,70%; 2010- 3,60%; 2011- 4%; 2012- 5,80 %; 2013- 4,02 %; 2014- 4,50 %; 2015- 4,60 %; 2016- 7,00 %; 2017- 7%; 2018- 5,90%), dando así un alza del 5,4 % al año.

Tabla 29. Salario total operario año 1 al año 10.

Periodo (año)	Salario básico (\$)	Aux. transporte (\$)	Seguridad social (\$)	Prestaciones sociales (\$)	Parafiscales (\$)	Total (\$)
1	12.648.000	1.058.532	2.658.862,56	2.919.158,40	1.138.320	20.422.872,9
2	13.330.992	1.058.532	2.802.441,14	3.076.792,95	1.199.789,28	21.468.547,3
3	14.050.865,57	1.058.532	2.953.772,96	3.242.939,77	1.264.577,90	22.570.688,2
4	14.809.612,31	1.058.532	3.113.276,70	3.418.058,52	1.332.865,11	23.732.344,6
5	15.609.331,37	1.058.532	3.281.393,64	3.602.633,68	1.404.839,82	24.956.730,5
6	16.452.235,27	1.058.532	3.458.588,90	3.797.175,90	1.480.701,17	26.247.233,2
7	17.340.655,97	1.058.532	3.645.352,70	4.002.223,40	1.560.659,04	27.607.423,1
8	18.277.051,39	1.058.532	3.842.201,74	4.218.343,46	1.644.934,63	29.041.063,2
9	19.264.012,17	1.058.532	4.049.680,64	4.446.134,01	1.733.761,10	30.552.119,9
10	20.304.268,83	1.058.532	4.268.363,39	4.686.225,25	1.827.384,19	32.144.773,6

Fuente. Elaboración propia.

5.2.3 Costos de servicios industriales. Los costos de servicios industriales para la planta de producción de fertilizante organo-mineral son la energía requerida para la trituradora, reactor, tamiz rotatorio y cosedora de sacos; y consumo de agua. Para determinar estos costos se tuvo en cuenta el costo de la energía en el municipio de Sopó Cundinamarca y el consumo energético de estos equipos siendo para la trituradora de 1,5 HP, el reactor de 3 HP y el tamiz rotatorio de 2 HP. El tiempo de operación para la trituradora es de 2 h/mes, para el reactor de 9 h/mes y el tamiz rotatorio 1 h/mes. En la tabla 30 se consideró la energía necesaria para el funcionamiento de estas máquinas. Se consideró el costo de kWh de estrato 4, siendo este de \$ 520,39²⁵⁸.

Tabla 30. Costos de servicios industriales.

ENERGÍA					
Consumo por equipo					
Equipo	Potencia motor (HP)	Costo(\$) kWh estrato 4	Consumo promedio mensual kWh	Costo mensual (\$/ kWh)	Costo anual (\$/ kWh)
Trituradora	1,5		2,2371	1.172,91	14.074,94
Reactor	3	520,39	20,1339	10.556,20	126.674,45
Tamiz rotativo	2		1,4914	781,94	9.383,29
Total					\$150.132,68
Consumo general					
Total					\$41.944
AGUA					
Concepto	Cargo fijo (\$)	Consumo m³	Tarifa básica (\$/ m³)	Costo Bimensual (\$)	Costo anual (\$)
Acueducto	7.065,10	9	4.147,26	44.390,44	266.342,64
Alcantarillado	4.009,54	9	3.058,73	31.538,11	189.228,66
Aseo (Comercialización, barrido y limpieza, limpieza urbana, recolección y transporte, disposición final)					
Aseo	40.377,60		1,4914	29.302,96	175.817,76
Total				\$631.389,06	

Fuente. Elaboración propia.

²⁵⁸ ENEL CODENSA. [En línea]: <https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>

5.2.4 Depreciación de equipos. Los bienes materiales tienen una vida útil y su desgaste implica una desvalorización anual. Esto está reglamentado por el decreto 3019 de 1989 el cual cita una vida útil de 10 años, como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31. Depreciación de maquinaria y equipos.

Periodo (año)	Depreciación (\$)	Depreciación acumulativa (\$)
1	10.270.200	10.270.200
2	10.270.200	20.540.400
3	10.270.200	30.810.600
4	10.270.200	41.080.800
5	10.270.200	51.351.000
6	10.270.200	61.621.200
7	10.270.200	71.891.400
8	10.270.200	82.161.600
9	10.270.200	92.431.800
10	10.270.200	102.702.000

Fuente. Elaboración propia.

5.2.5 Mantenimiento de equipos. Aunque todos los equipos son nuevos y no presentaran fallas en aproximadamente los primeros 2 años, el coste anual de mantenimiento debe estimarse entre el 2% y 3% del coste de equipos + montaje²⁵⁹. En este proyecto, se realizará la estimación con el valor mínimo (2%), dado que el uso de estos equipos será exiguo, y teniendo en cuenta su respectivo aumento anual según el IPC, se muestra en la tabla 32.

²⁵⁹ GARRIDO, Santiago. Ingeniería de mantenimiento. 2010. [en línea]: <http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/26-articulos-destacados/10-el-presupuesto-de-mantenimiento>

Tabla 32. Costo mantenimiento de equipos.

Periodo (año)	Mantenimiento (\$)
1	2.054.040
2	2.127.985,44
3	2.204.592,92
4	2.283.958,26
5	2.366.180,76
6	2.451.363,27
7	2.539.612,34
8	2.631.038,39
9	2.725.755,77
10	2.823.882,98

Fuente. Elaboración propia.

5.2.6 Costos del producto. Se tiene en cuenta el costo de empaque del producto final y los costos de análisis de parámetros en laboratorios externos.

Tabla 33. Costos del producto.

Concepto	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total anual (\$)
Saco de propileno de 2 kg	164	50	98.400
Laboratorios	1	293.000	3.516.000
Total			\$ 3.614.400

Fuente. Elaboración propia

5.3 INGRESOS

Los ingresos son ganancias económicas o entradas de dinero, para este caso se involucró la venta del fertilizante orgánicomíneral que se determinó teniendo en cuenta el rendimiento promedio de los tres reactores (39,35%). El precio actual del fertilizante orgánicomíneral distribuidos en sacos de polipropileno, de 2 kg tiene un valor de \$30.000. En la tabla 34 se muestra los ingresos de la planta de producción a 10 años, siguiendo un incremento del 15% anual del precio de venta del producto a comercializar.

Tabla 34. Ingresos de la planta de producción de fertilizante orgánicomíneral.

Periodo (año)	Venta por unidad(\$)	Unidades (saco 2 kg)	Costo total (\$)
1	30.000,00	164	59.040.000
2	34.500,00	164	67.896.000
3	39.675,00	164	78.080.400
4	45.626,25	164	89.792.460
5	52.470,19	164	103.261.329
6	60.340,72	164	118.750.528
7	69.391,82	164	136.563.107
8	79.800,60	164	157.047.573
9	91.770,69	164	180.604.709
10	105.536,29	164	207.695.416

Fuente. Elaboración propia.

De igual manera, se tiene un ahorro en disposición de residuos en el relleno sanitario anual.

- **Costos de disposición de residuo (lodo) en relleno sanitario.** Actualmente la empresa de servicios públicos EMSERSOPÓ, paga a una entidad externa por la recolección y traslado de los lodos residuales al relleno sanitario Mondoñedo, generando costos anuales de \$14.107.200²⁶⁰. Este valor se tomó un ahorro de disposición en relleno sanitario al realizar el flujo de caja (ingreso).

Tabla 35 . Ahorro en disposición de lodos anual.

Periodo (año)	Costo anual
1	\$ 14.107.200
2	\$ 14.615.059
3	\$ 15.141.201
4	\$ 15.686.285
5	\$ 16.250.991
6	\$ 16.836.026
7	\$ 17.442.123
8	\$ 18.070.040
9	\$ 18.720.561
10	\$ 19.394.502

Fuente. Elaboración propia.

5.4 FLUJO DE CAJA NETO

El flujo de caja neto es uno de los informes financieros más importantes, que presenta en detalle los flujos de ingresos y egresos de dinero que tiene una empresa en un periodo de tiempo. En este se evalúa la viabilidad y rentabilidad de la ejecución del proyecto. Para el desarrollo de este apartado, se tiene en cuenta los ingresos como la venta del producto final (fertilizante organicomíneral), la inversión y los egresos como los costos de insumos, producto, servicios industriales, mantenimiento y mano de obra que tendría la planta, teniendo en cuenta el impuesto de renta (33%)²⁶¹. A sí mismo se realiza una tabla de amortización, por el préstamo de la mitad de la inversión (\$31.707.000) por parte de una entidad financiera al 19,80% anual, como se observa en el ANEXO G.

²⁶⁰ EMSERSOPÓ, 2018.

²⁶¹ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA Ley 1739 (23, diciembre, 2004) Por medio de la cual se modifica el Estatuto Tributario. Bogotá D.C. Revisado. 2018.

5.5 INDICADORES

Con el fin de determinar la viabilidad del proyecto, se evalúan los indicadores de: valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio/costo.

5.5.1 VPN. El valor presente neto (VPN) es el método más conocido al momento de evaluar proyectos de inversión a largo plazo, permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero: maximizar una inversión. El valor del VPN puede ser positivo, negativo o cero²⁶². Si el valor presente neto es positivo, indicará que el proyecto es capaz de generar suficientes ingresos para recuperar la inversión y además generar ganancia; si el VPN es negativo, indicará que el proyecto no es capaz de producir suficiente dinero ni para recuperar la inversión, lo que revela que el proyecto no es factible y la acción correcta será no ejecutarlo. Y finalmente, si el valor del VPN es igual a cero, indicará que el proyecto sólo producirá lo suficiente para que se recupere la inversión, en este caso, tampoco se ejecutaría el proyecto dado que no se generarían ganancias²⁶³. El VPN se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 16. Valor presente neto proyecto.

$$VPN = -I_0 + \frac{FCN_{1,año}}{1 + (1 + k)^1} + \frac{FCN_{2,año}}{1 + (1 + k)^2} + \dots + \frac{FCN_{n,año}}{1 + (1 + k)^n}$$

Donde:

I_0 : inversión inicial

FCN: flujo de caja neto

k : tasa interna de oportunidad (TIO):13,06% (tasa técnica de proyección: 4,09% DTF; 2,44% IPC; 6,53 TTP)²⁶⁴

Con los datos de proyección a 10 años, se realiza el cálculo con una tasa interna de oportunidad de 13,06%, el valor presente neto de esta proyección es de \$34.078.520, lo cual indica que el proyecto es ejecutable, debido a que se recupera el costo de inversión y adicional a esto, generaría buenos ingresos anuales.

²⁶² DIDIER VARIECO, José. Valor presente neto. Ibagué, Colombia. 2013. p.2

²⁶³ BLANCO, A. Formulación de proyectos. Editorial Teto. 5ta edición. Caracas, Venezuela. 2006.

²⁶⁴ BANCO DE LA REPUBLICA. Tasa interés de intervención.2018.

5.5.2 TIR. Tasa Interna de Retorno. Es la tasa de interés o rentabilidad que genera un proyecto, se encarga de medir la rentabilidad de una inversión, mediante el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá esta, para los montos que no hayan sido retirados del proyecto y funciona como una herramienta complementaria del VPN. Si el valor de la TIR es mayor que la TIO, el proyecto tiene rentabilidad, por el contrario, si es menor, no se debe ejecutar.

La TIR se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 17. Tasa interna de retorno del proyecto.

$$0 = -I_0 + \frac{FCN_{1,año}}{1 + (1 + k)^1} + \frac{FCN_{2,año}}{1 + (1 + k)^2} + \dots + \frac{FCN_{n,año}}{1 + (1 + k)^n}$$

Donde:

I_0 : inversión inicial

FCN: flujo de caja neto

k: tasa interna de oportunidad (TIO): 13,06%²⁶⁵

Para el proyecto se obtiene una TIR de 42%. De acuerdo con el resultado anterior se determina el margen de rentabilidad siendo esta la diferencia entre la TIR y TIO como se muestra a continuación: margen de rentabilidad: $TIR - TIO = 28,94\%$. De acuerdo con este valor, el proyecto tiene buena rentabilidad.

5.5.2 Relación Costo/Beneficio. La Relación beneficio/costo (R B/C), es un indicador que mide el grado de desarrollo y bienestar que un proyecto puede generar a una comunidad. Se trae a valor presente los ingresos netos de efectivo asociados con el proyecto.

La R B/C, se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 18. Relación beneficio costo.

$$R \frac{B}{C} = \frac{VA}{I_0} = \frac{\frac{FCN_{1,año}}{(1 + k)^1} + \frac{FCN_{2,año}}{(1 + k)^2} + \dots + \frac{FCN_{n,año}}{(1 + k)^n}}{I_0}$$

²⁶⁵ BANCO DE LA REPUBLICA. Tasa interés de intervención. 2018.

Donde:

I_0 : inversión inicial

FCN: flujo de caja neto

k: tasa interna de oportunidad (TIO):13,06%²⁶⁶

Para el proyecto se obtiene una relación B/C de 1,74, indicando que el proyecto presenta una buena rentabilidad.

²⁶⁶ BANCO DE LA REPUBLICA. Tasa interés de intervención.2018.

6. CONCLUSIONES

- Se realizaron análisis de carácter fisicoquímico y microbiológico a los lodos residuales en el centro de biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, los resultados más relevantes fueron: relación de C/N igual a 12,36, humedad de 78,63%, y un pH de 7,4; y de acuerdo con la caracterización microbiológica realizada, el lodo contiene diferentes microorganismos patógenos, al igual que microorganismos mesófilos aerobios ($>1000 \times 10^4$ UFC/g). Dichos resultados son característicos de lodos terciarios o activados procedentes de aguas residuales domésticas. Con respecto a la caracterización de las podas de césped y papel periódico, se acudieron a referencias bibliográficas de donde se obtuvieron valores de pH cercanos al neutro y relación C/N de 21,30 y 400 respectivamente.
- Se realizó una selección del sistema de compostaje por el método de matriz PUGH teniendo en cuenta principalmente las variables de eficiencia, costos, duración del proceso y espacio; dando como resultado que el método más conveniente es Compostaje Aerobio por medio de reactor horizontal con Volteo. El desarrollo experimental del proceso se llevó a cabo utilizando tres reactores a escala laboratorio, tomándose periódicamente lecturas de las variables de temperatura, pH, humedad y cenizas. Los tres reactores mostraron repetitividad en los resultados. El producto obtenido cumple con la norma NTC 5167 para parámetros físicoquímicos para abonos orgánico-minerales, pero el análisis microbiológico muestra que no cumple la norma para los rangos de microorganismos patógenos, para lo cual se puede sugerir un pos-tratamiento de estabilización alcalina o por temperatura que lleve el producto a los rangos aceptados por la norma.
- Se determinaron las especificaciones técnicas del proceso, llevando a cabo la ejecución del escalamiento del proceso de modelo laboratorio a escala piloto empleando el método propuesto por Behrentz, E. y Giraldo, E. (1999), el cual aplica la similitud geométrica y se fundamenta en el hecho de que hay un factor adimensional que relaciona la energía disipada en el sistema con la energía generada y que esta relación se debe mantener constante en los niveles de escala del proceso. Para este caso, se muestra que para una longitud del reactor horizontal piloto de 1,5 se cumple que el Delta T es de 1°C . Se hizo el cálculo de la transferencia (moto - reductor) de acuerdo con la masa de producto a manejar y la velocidad de rotación del reactor adecuada (6 rpm) dejando como resultado un motor de 3 HP.
- Se realizó una evaluación financiera a escala piloto, donde se estimaron unos costos para el primer año en inversión, y funcionamiento de 10 años, donde el costo de maquinaria y mano de obra es el más representativo. Los costos de producción son relativamente bajos debido a que la materia prima utilizada son

los lodos provenientes de la PTAR, el papel, y las podas son desechos que produce el municipio de Sopó. Una vez analizados los resultados del estudio financiero se encuentra que el proyecto tiene viabilidad económica al presentar una VPN positivo, proyectada a 10 años: \$ 34.078.520,13, una TIR de 42% y relación beneficio/ costo de 1,74, lo cual indica que el proyecto es viable y tendrá una recuperación de inversión de 2 años.

7. RECOMENDACIONES

- Hacer un diagnóstico y proyecto de mejoramiento de la eficiencia en la PTAR de Sopó para que produzca la cantidad de lodo esperado, y bajen los niveles de contaminación por *E-Coli* y coliformes que están presentando en la actualidad. De igual manera, se recomienda complementar el proceso de compostaje con una estabilización alcalina u otro método como tratamiento térmico, teniendo en cuenta que por las características propias del lodo producido en la PTAR, no se obtienen buenos resultados microbiológicos al finalizar el compostaje.
- Estudiar y monitorear el comportamiento de variables como contenido de nitrógeno, carbono y oxígeno, y comportamiento de microorganismos en cada etapa del proceso de compostaje, con el fin de desarrollar un estudio más detallado de la influencia de estos parámetros en el proceso de compostaje.
- Realizar una experimentación modificando variables influyentes como: relación C/N, porcentaje de humedad, frecuencia de aireación; entre otros. Así mismo, se recomienda utilizar otros materiales que se encuentren biodisponibles en el municipio, de fácil biodegradación y que aporten un significativo contenido de carbono.
- Se recomienda evaluar la experimentación mediante otro sistema de compostaje. En esta experimentación (escala laboratorio) se realizó por medio de reactor por eficiencia, tiempo y espacio, pero se considera que a escala piloto es conveniente emplear sistema de pilas manejando criterio de costos.
- Evaluar el tiempo de retención del material a compostar en el tambor rotativo para que se lleve una completa biodegradación del material.
- Implementar técnicas de calefacción en el reactor diseñado, que permita generar, mantener y controlar la temperatura en todo el proceso de compostaje.
- Se sugiere realizar una caracterización de la producción agrícola, y caracterización físicoquímica de los suelos para construir un fertilizante que constituya a una agricultura de precisión y que apunte al cultivo con alta participación en la producción agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

AJUNTAMENT DE BARCELONA. Guia de compostatge. Regidoria de Ciutat Sostenible. 1998.

ALI, Muntjeer.; KAZMI, Absar Ahmad. y AHMED, Naseem. Study on effects of temperature, moisture and pH in degradation and degradation kinetics of aldrin, endosulfan, lindane pesticides during full-scale continuous rotary drum composting. En: Chemosphere. May, 2014. vol. 102.

ÁLVAREZ DE LA PUENTE, José M. Manual de compostaje para agricultura ecológica.p.9.

ARIAS ISAZA, G.C., PÉREZ MÉNDEZ, M.A., LAINES, J.R., CASTAÑÓN, G. Comparison of two ventilation techniques in the decomposition of organic matter. México. 2009.

BANCO DE LA REPUBLICA. Tasa interés de intervención. 2018.

BARRERA STERLING, Lina Paola. Estandarización del proceso de compostaje en la obtención de abono orgánico a partir de residuos sólidos orgánicos generado en el municipio de Sibaté. Universidad de América. Bogotá, 2010.

BARRERO, Isabel Cristina. Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en un Vertisol de Valle del Cauca. Palmira, Colombia. 2016.

BEHRENTZ, E. y GIRALDO, E., Modelación a escala del proceso de compostaje aerobio en pila estática con aireación forzada. En: Revista Colombiana de Biotecnología, Colombia. 1999. v.2 fasc.2 p.51 – 59.

BLANCO, A. Formulación de proyectos. Editorial Teto. 5ta edición. Caracas, Venezuela. 2006.

CAMARGO, Y., VÉLEZ, A. Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Barranquilla, Colombia. 25 de septiembre de 2009.

CAMPITELLI, Paola, et al. Compostaje. Obtención de abonos de calidad para plantas. Argentina. Editorial Brujas, 2014. p. 37

CARNES, R. Y LOSSIN, R. An investigation of the pH characteristics of compost. Compost Sci. 5. 1970.

CHIUMENTI, A. Modern Composting Technologies. Reciclaje y tratamiento biológico de los residuos sólidos Municipales. Quito, Ecuador: Editorial Ecuador. 2005.

COLMENARES MAYANGA, Wagner. Generación y manejo de gases en rellenos sanitarios. 2007.

CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1739. Por medio de la cual se modifica el Estatuto Tributario. Bogotá D.C. Revisado. Colombia. 2018.

CONFAGAN, FADEGAN, JUNAC. Manual Pastos y Forrajes. 1986. p.235

COSTA, F; GARCÍA, C; HERNÁNDEZ, T. Y POLO, A. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. 1995.

DE BERTOLDI, M.; VALLINI, G., PERA, A. 1985. Composting of Agricultural and other wastes. p.30.

DEPARTAMENT OF ENVIROMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS (DEFRA), 2010.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Índice de precios al consumidor. Bogotá D.C., Colombia. 2017. p.1. Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc#documentos-de-referencia-ipc>.

_____. Tercer censo Nacional Agropecuario. Cundinamarca, 2014.

DÍAZ, Luis Felipe., BERTOLDI, Marco., BIDLINGMAIR, Werner. Compost Science and Technology. En: Elsevier Science. Jul 29. 2011.

DIDIER VARIECO, José. Valor presente neto. Ibagué, Colombia. 2013. p.2.

DOCAMPO, Roberto. Compostaje y compost. Revista INIA. 2013. p. 64-64.

DOMÍNGUEZ, J., ELVIRA, C., SAMPEDRO, L. A. Effects of bulking agents in composting of pig slurries. The science of composting . 1996. p.1146-1149.

DOUBLET, Jérémy, et al. Sewage sludge composting: Influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts. En: Waste management, vol. 30. 2010.

Earth Green Colombia S.A.S. [en línea]: <http://www.earthgreen.com.co/aprenda-mas-pyr/74-principios-basicos-del-compostaje>.

ELIKA. Fundación vasca para la seguridad agroalimentaria. Escherichia coli. Febrero, 2013. [en línea]: http://www.elika.net/datos/pdfs_agrupados/Documento84/3.Ecoli.pdf.

ENEL CODENSA. [En línea]: <https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Greenhouse gas emission: Methane Emissions. p.1.

EPSTEIN, Eliot. Industrial composting: environmental engineering and facilities management. New York, USA. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC. 2011.

FERNÁNDEZ, F., SÁNCHEZ, V., RODRIGUEZ, L., VILLASEÑOR, J. Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste winery waste in a rotatory drum reactor. Waste Management 30. 2012. p. 1948-1956.

Fertilización de pastos mejorados. En: Fertilización de cultivos en clima frío. 2a. Reimpresión. Abonos Nutrimón.1993.p. 157 - 175.

FOGARTY., KELLY. Microbial enzymes and biotechnology. 1990.

GLOBAL WARMING FORECAST. Methane and carbon dioxide global warming potential. [En línea] United States, 2018., p.1 . Disponible en <http://www.global-warming-forecasts.com/methane-carbon-dioxide.php>.

GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA Y SECRETARIA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Mapa de uso actual y cobertura vegetal de los suelos departamento de Cundinamarca y secretaría de agricultura y desarrollo rural, Bogotá. 2015.

GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, Jorge, et al. Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues. En: Journal of environmental management, vol. 147. 2015.

HAUG, Roger Tim. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis publishers. July 23 1993. Boca raton. Florida. ISBN: 9780873713733.

HIMANEN, Marina y HÄNNINEN, Kari. Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges -Effect of feedstock on the process and quality of compost. En: Bioresource technology. vol. 102. 2011.

HOGAN, John. MILLER, Frederick, FINSTEIN, Melvin. Physical modeling of composting ecosystem. En: Applied and Environmental Microbiology. vol. 55.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018, ISBN9789588585673. P. 153.

_____. Suelos. Método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de agua. NTC 1495. 2013.

_____. Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Definiciones, clasificación y fuentes de materia prima. NTC 1927. Bogotá D.C.: El instituto, 2012.

_____. Productos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. NTC 5167. Bogotá D. C.: El Instituto, 2011.

_____. Guía técnica colombiana GTC53-7. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. Bogotá D.C., Colombia. 26 de abril de 2006. Ed. 2006-05-09. I.C.S.: 13.030.10.

_____. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998.

_____. Determinación de humedad, cenizas y materia orgánica. NTC 1886. Bogotá D.C.: El instituto, 1983.

INSTITUTO COLOMBIANO Y AGROPECUARIO (ICA). MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Pastos y forrajes. Principales pastos de corte. Disponible en: https://www.jica.go.jp/project/nicaragua/007/materials/ku57pq0000224spz-att/Manual_de_Pastos_y_Forrajes.pdf.

_____. Acondicionadores y mejoradores de suelos. p. 22.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). 2003. Disponible en: [https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/\\$FILE/NSS-ES-03.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/$FILE/NSS-ES-03.pdf).

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). Available: [https://www.ipni.net/publication/nss-s.nsf/0/0FA2E8A5E4F0C56B85257BBA00598776/\\$FILE/NSS-ES-01.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss-s.nsf/0/0FA2E8A5E4F0C56B85257BBA00598776/$FILE/NSS-ES-01.pdf).

IZQUIERDO F., P. Efecto de la frecuencia de corte, la fertilización nitrogenada y la densidad de siembra sobre la producción de materia seca del raigrás aubade (*Lolium hybridum*). Tesis de Zootecnista. Bogotá. Universidad Nacional. Facultad de Zootecnia. 1981.p.105.

KABBASHI, Nassereldeen. Sewage sludge composting simulation as carbon/nitrogen concentration change. En: Journal of environmental sciences. Vol. 23. 2011.

KALAMDHAD, A., SINGH, K. Assessment of bioavailability of heavy metals during rotary drum composting of green waste. Ecological engineering. 52. 2013.

_____. Maturation of primary stabilized compost from rotary drum. Resource, conservation and recycling 53. 2009. p. 386-392.

KALAMDHAD, Ajai S, et al. Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves. En: Bioresource technology. vol. 100. 2009.

_____. Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotary drum composter. En: Resources, conservation and recycling, vol. 52. 2008.

_____. Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. En: CHEMOSPHERE. vol. 74. 2009.

KOMILIS, Dimitris. Ham, Robert. and PARK, Jae. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid waste. Water research. 2004.

KULCU, R., YALDIZ, O. Effects of air flow directions on composting process temperature profile. 2008.

Kulikowska, D. y Z. Gusiatin. Sewage sludge composting in a two-stage system: Carbon and nitrogen transformations and potential ecological risk assessment. Waste Manag. 38.2015.

KUTER, Geoffrey., H.A, Hoitink., R.A, Rossman. Effects of Aeration and Temperature on Composting of Municipal Sludge in a Full-Scale Vessel System. 1985.

LENNOX, Josiah Asime, et al. Comparative degradation of sawdust by microorganisms isolated from it. En: African journal of microbiology research, vol. 4. 2010.

LI, Zhentong, et al. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. En: Chemosphere, vol 93. 2013.

LLORET, Eva, et al. Two-stage mesophilic anaerobic-thermophilic digestion for sludge sanitation to obtain advanced treated sludge. En: Chemical engineering journal, vol. 230. 2013.

LUTFI AL-MEFLEH, Mohammed Nader. Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. Departamento de ingeniería civil. MADRID, 2003. p. 269.

MASON, Ian G. Mathematical modelling of the composting process: A review. En: Waste management, vol. 26. 2006.

MINISTERIO DE AGRICULTURA. SERVICIO AGRÍCOLA GANADERO. Agricultura orgánica nacional. Bases técnicas y situación actual. Chile. p. 156.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287.2014. p. 4-5.

NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. Chapter 2. Composting. 2000.

NAYAK, Ashish Kumar. y KALAMDHAD, Ajai S. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis. En: International journal of recycling of organic waste in agriculture, vol. 4. 2015.

NEGRO, María José, VILLA. F, and AIBAR Joaquín. Producción y gestión del compost. CIEMAT, DGA. Zaragoza, España. 2002.

NIWAGABA, C., et al. Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. En: Waste management, vol. 2009. p. 585-589.

NOLLER, C.H. y RHYKERD, C.L. Relationship of nitrogen fertilization and chemical composition of forage to animal health and performance. In: Forage Fertilization. American Society of Agronomy. p. 363 - 394.

NOVOA, Jennifer. Factibilidad para la creación de una empresa productora de abono orgánico en el municipio de San Martín, Cesar. Trabajo de grado Profesional en Producción Agroindustrial. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Instituto de proyección regional y educación distancia, 2010.

OFICINA DE PLANEAMIENTO Y PRESUPUESTO UNIDAD DE DESARROLLO MUNICIPAL. Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimiento. Uruguay. Febrero, 1999.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Roma, Italia, 2007.

P. Bruno., M, Caselli., G. Gennaro, G. d., M. Solito., M. Tutino. Monitoring of odor compounds produce by solid waste treatment plants with diffusive samplers. Waste Management . 2007.p. 539 - 544.

PACHÓN, Magda Estefanía., VARGAS, Anlle Daniela. revisión sobre el estudio de la dinámica de los microorganismos presentes en el compostaje de subproductos de la caña de azúcar. Risaralda. 2015.

PAGANS, E., FONT, X., & SÁNCHEZ, A. Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. Journal of Hazardous Materials. 2006.p.179-186.

PINEDA, Osmin. El problema de las plantas tóxicas dentro de los potreros. 2017.

PORCEL, Álvaro Marcelo. Sistema de gestión de residuos sólidos orgánicos en el régimen abierto para varones del centro de rehabilitación Santa Cruz- Palmasola. potential. United States, 2017. p. 1. Disponible en <http://www.global-warmingforecasts.com/methane-carbon-dioxide.php>.

PROIETTI, Primo, et al. Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. En: Journal of cleaner production, vol. 137. 2016.

Pugh, S. Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. Addison-Wesley.1991.

RIASCOS GUERRERO, Ricardo. Fertilización de cultivos en clima frío. Monómeros Colombovenezolanos S.A. Universidad Nacional de Colombia. p. 48.

RODRÍGUEZ, Luis., et al. Domestic sewage sludge composting in a rotary drum reactor: Optimizing the thermophilic stage. En: Journal of environmental management, vol. 112. 2012.

SANABRIA ORTIZ, Natalia., SEGURA AMADOR, Yessica Andrea. Propuesta de producción de abono orgánico mediante un proceso de compostaje con los residuos sólidos orgánicos del municipio de Silvania. Universidad de América. Bogotá, 2010.

SÁNCHEZ MONEDERO, M.A., ROIG A. PAREDES, C., BERNAL, MP. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures.2001.

SANCLEMENTE REYES, Óscar Eduardo., GARCÍA ARBOLEDA, Mauricio, VALENCIA TRUJILLO, Francis Liliana. Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 2011. p.3.

SILVA, Juan Pablo., LÓPEZ, Piedad., VALENCIA, Pady. Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. Escuela de Ingeniería de los

Recursos naturales y del Ambiente (EIDENAR). Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería.p.7-8.

SINGH, Jiwan. y KALAMDHAD, Ajai S. Effect of carbide sludge (lime) on bioavailability and leachability of heavy metals during rotary drum composting of water hyacinth. En: Chemical speciation and bioavailability, vol. 26. 2014.

SIRINATH R, Iyengar., PRASHANT P, Bhavé.In-vessel composting of household wastes. 2006.

SMET, Erik., LANGENHOVE, Herman Van. and BO, Inge De. The emission of volatile compounds during the aerobic in the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. 1999.

STACY, SACKETT., FILED UNDER DESIGN. Is newspaper safe for your garden?.2016.

SUDHARSAN VARMA. y KALAMDHAD, Ajai S. Evolution of chemical and biological characterization during thermophilic composting of vegetable waste using rotary drum composter. En: International journal of environmental science and technology, vol. 12. 2015.

THCOAT. Conductividad térmica de materiales para la construcción. 2014

URRUTIA CHAPARRO, Jorge. Evaluación de la biodegradación de residuos sólidos ganaderos tratados mediante pilas de compostaje. 2013. p.14.

VICENTE,J., CARRASCO, J.E., NEGRO, M.G. El compostaje como tecnología para el tratamiento de residuos: Compostaje de bagazo de sorgo dulce con diferentes fuentes nitrogenadas. 1996. p. 12.

WEHRHAHN, Cristián. Compostaje como Solución de Manejo de Residuos Sólidos. Universidad de Chile. Abril 22, 2006.

WU, Shaohua, et al. Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting. En: International Biodeterioration & biodegradation, vol. 119. 2017.

YUAN, Jing, et al. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. En: Waste management, vol. 56. 2016.

ZAHRA EL OUAQOUDI, Fatima, et al. Evaluation of lignocelullose compost stability and maturity using spectroscopic (FTIR) and thermal (TGA/TDA) analysis. En: Ecological engineering, vol. 75. 2015.

ZULARISAM, Abd Wahid., et al. Production of biofertilizer from vermicomposting process of municipal sewage sludge. En: Journal of applied sciences, vol. 10. 2010.

ANEXOS

ANEXO A.

RESULTADOS DE CARACTERIZACIONES DE BIOSÓLIDO Y COMPOST



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
CENTRO DE BIO-SISTEMAS**
Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS
ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS**

ORDEN DE TRABAJO No. 000932	FECHA SOLICITUD : 31-ago-18	FECHA IMPRESIÓN : 05-oct-18
Cliente Nombre: DANIELA MARIN BAHAMON Dirección: CL 3 SUR 8-59 Municipio: SOPO Teléfono: 3053149075 Fax: E-Mail: daniela.marin@uamerica.edu.co		Finca Nombre: PETAR DE BRICEÑO Municipio: BRICEÑO Departamento: ANTIOQUIA Solicitante: DANIELA MARIN BAHAMON Materia: No Especificado Identificación: LODO AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS
No. Muestra: 86		

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Humeda
Porcentaje de Humedad	%	78.63			
Densidad Aparente	g*cm ³	1.20			
Carbono Orgánico	%	6.08	28.43		
Materia Orgánica	%	13.19	61.70		
Cenizas	%		38.30		
Relación Carbono:Nitrógeno	p:p	12.36	12.36		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	7.40			
Conductividad Eléctrica	dS/m	4.20			
Nitrógeno Total (N):	%	0.49	2.30		4.9
Fósforo (P):	%	0.09	0.41		0.9
Potasio (K):	%	0.04	0.17		0.4
Calcio (Ca):	%	1.11	5.20		11.1
Magnesio (Mg):	%	0.03	0.16		0.3
Sodio (Na):	%	0.009	0.044		0.1

Metodología:

N según Kjeldahl, P por colorimetría, K, Ca, Mg, Na por absorción atómica. Carbono orgánico por calcinación. pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

www.utadeo.edu.co
NIT. 860.006.848-6
Personería Jurídica
No. 2613/1959 Minjusticia

Sede Chia
Autop. Norte Km. 10 vía Bogotá-Briceño
PBX 8650218/219/239
centro.biosistemas@utadeo.edu.co
Chía - Colombia

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Muestra No. 173-01

Fecha recepción de muestra: 21 de septiembre de 2018

Fecha de entrega resultados: 24 de septiembre de 2018

Cliente: Daniela Marin Bahamon

Descripción de la muestra: Muestra de lodo. Tratamiento de aguas residuales

Análisis solicitado: Recuento de Coliformes totales, Coliformes Fecales, Escherichia coli y Aerobios Mesófilos.

Método: Se realizó diluciones seriadas, siembra en medios de cultivo específicos, incubación de 24 a 48 horas y recuento en placa.

RESULTADOS

Tabla 1. Recuento de Coliformes totales, fecales, E.coli y Aerobios Mesófilos.

MUESTRA	MICROORGANISMOS
173-01	<p>Coliformes Totales: 3,2 x 10⁶ UFC/g</p> <p>Coliformes Fecales: 7 x 10⁴ UFC/g</p> <p>E. coli: 3 x 10⁴ UFC/g</p> <p>Aerobios Mesófilos >1000 x 10⁴ UFC/g</p>

Coliformes totales, fecales y E.coli:

El grupo de microorganismos Coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana ya que los Coliformes, son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, están presentes en el tracto gastrointestinal en grandes cantidades, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas, se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección.

Observaciones: Según el decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura, para agua de riego el número (NMP) de Coliformes Totales no deberá exceder de 5.000 cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto y el número (NMP) de Coliformes Fecales no deberá exceder 2.000 cuando se use el recurso para el mismo fin del literal anterior. Según el decreto 1575 de 2007 del Ministerio de la protección social, y el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial (Resolución No.2115), para agua de consumo humano el nivel máximo de Coliformes Totales es 0 UFC/100 cm³ y de E. coli es 0 UFC/100 cm³.

Coliformes totales, fecales y E.coli:

El grupo de microorganismos Coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana ya que los Coliformes, son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, están presentes en el tracto gastrointestinal en grandes cantidades, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas, se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección.

Valores permitidos

Valores	PARAMETROS	
	Coliformes totales	Coliformes Fecales E.coli
Valor normal mínimo de uso agrícola	5 x 10 ³	2 x 10 ³
Valor normal mínimo de consumo humano	0	0

Recomendaciones:

Consultar con el profesional a cargo

BIBLIOGRAFÍA

Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. INDICADORES DE CONTAMINACION FECAL EN AGUAS, capítulo 20.

**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS
ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS**

ORDEN DE TRABAJO No.	001224	FECHA SOLICITUD :	19-nov-18	FECHA IMPRESIÓN :	27-nov-18
-----------------------------	--------	--------------------------	-----------	--------------------------	-----------

Cliente		Finca	
Nombre: DANIELA MARIN BAHAMON Dirección: CL 3 SUR 8-59 Municipio: SOPO Teléfono: 3053149075 Fax: E-Mail: daniela.marin@uamerica.edu.co		Nombre: PETAR DE BRICEÑO Municipio: BRICEÑO Departamento: ANTIOQUIA	
No. Muestra: 106		Solicitante:	DANIELA MARIN BAHAMON
		Material:	No Especificado
		Identificación:	ABONO ORGANICO

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	35.66			
Densidad Aparente	g*cm ⁻³	0.50			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+ kg ⁻¹	37.25	57.90		
Carbono Orgánico	%	13.15	20.43		
Materia Orgánica	%	28.53	44.34		
Cenizas	%		55.66		
Relación Carbono:Nitrógeno	p.p	9.73	9.73		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	7.40			
Conductividad Eléctrica	dS/m	13.38			
Nitrógeno Total (N):	%	1.35	2.10		13.51
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄):	%	0.012	0.019		0.12
Nitrógeno Nítrico (NO ₃):	%	0.005	0.008		0.05
Fósforo (P):	%	0.30	0.47		3.01
Potasio (K):	%				
Calcio (Ca):	%				
Magnesio (Mg):	%				
Azufre (S):	%	0.44	0.69		4.45
Sodio (Na):	%				
Hierro (Fe):	ppm				
Manganeso (Mn):	ppm				
Cobre (Cu):	ppm	23.5	36.5		0.024
Zinc (Zn):	ppm	283.7	441.0		0.28
Boro (B):	ppm	8.7	13.6		0.009

Metodología:

N según Kjeldahl, P y B por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn por absorción atómica. Carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1N). pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores y menores en relación peso a peso.



Quim. Adriana Mireya Zamudio S.
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

ANEXO B.
EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA EL SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES

Imagen 16. Termómetro digital portátil



Imagen 17. Tiras indicadoras de pH



Imagen 19. Potenciómetro de marca Oakton



Imagen 18. Balanza analítica de precisión 0,0001.



Imagen 19. Mufla



Imagen 20. Desecador



ANEXO C.

PROTOCOLOS DE MEDICIÓN VARIABLES PROCESO COMPOSTAJE

Diagrama 1. Procedimiento medición temperatura.

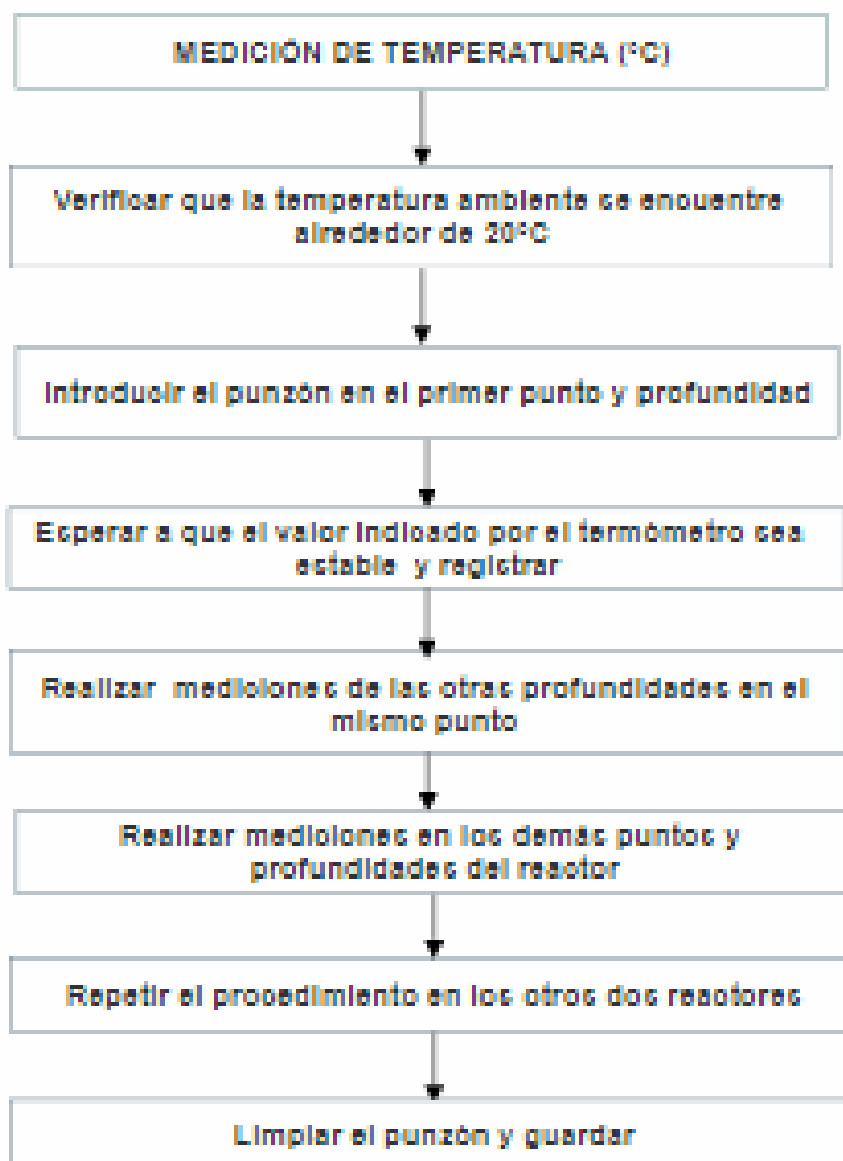


Diagrama 2. Procedimiento medición de pH

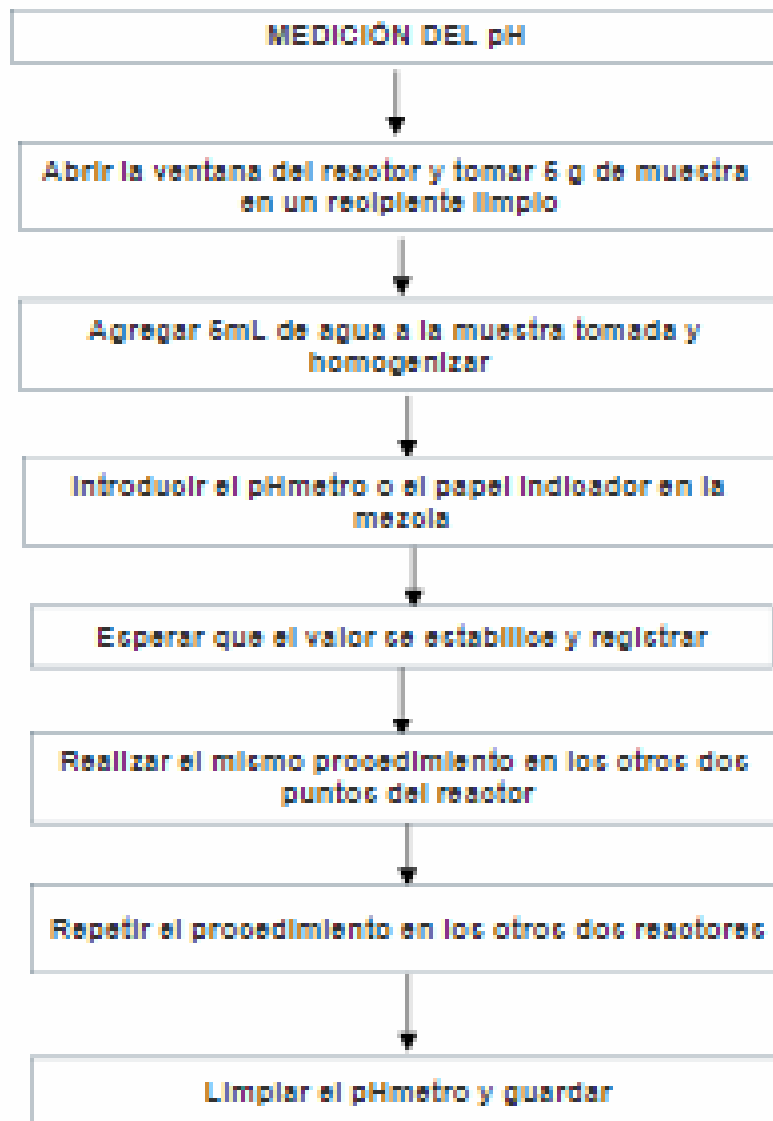


Diagrama 3.Procedimiento medición de humedad

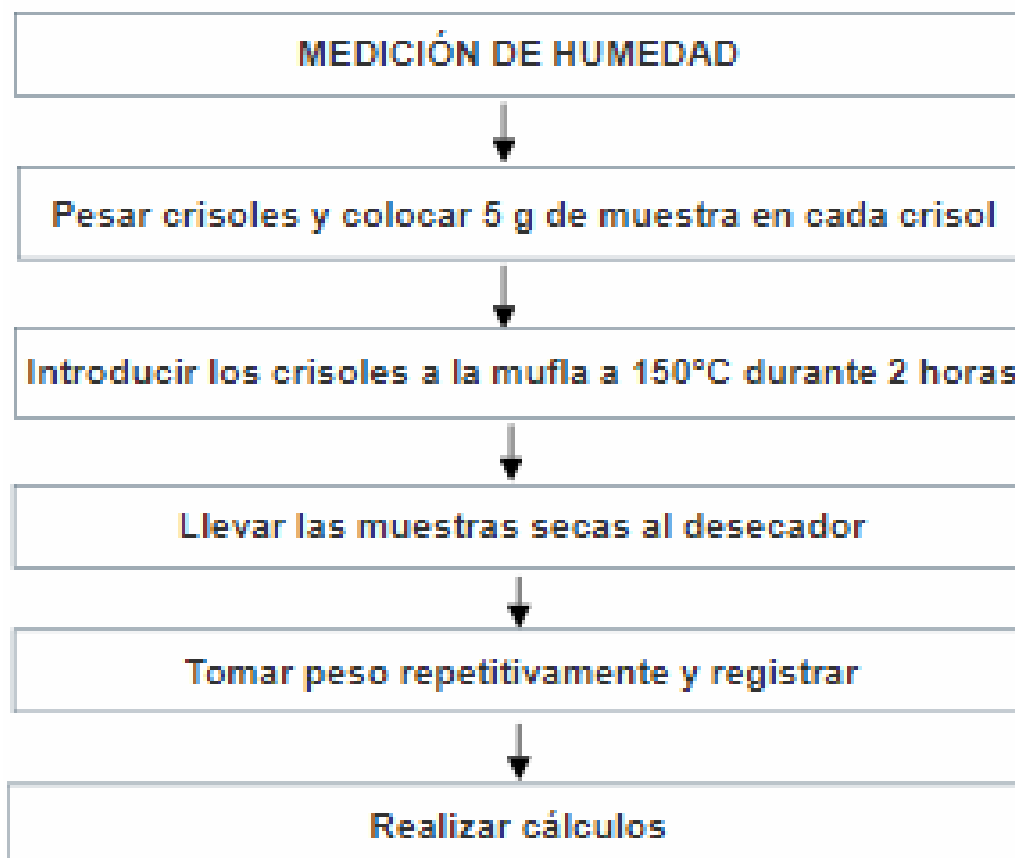
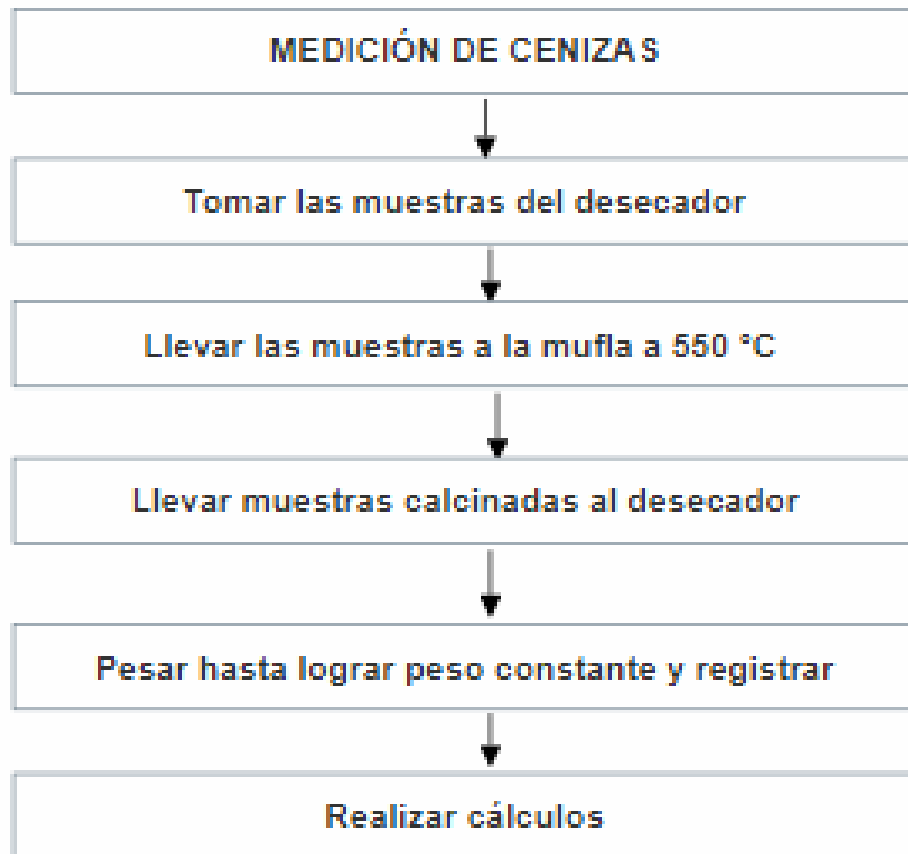


Diagrama 4. Procedimiento medición contenido de cenizas



ANEXO D.
BALANCE DE MATERIALES INVOLUCRANDO RELACIÓN C / N Y HUMEDAD
(INICIAL)

Balance global

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 \quad (1)$$

Balances elementales

$Q_1C_1 + Q_2C_2 + Q_3C_3 = Q_4C_4$ (2)
$Q_1N_1 + Q_2N_2 + Q_3N_3 = Q_4N_4$ (3)
$Q_1H_1 + Q_2H_2 + Q_3H_3 = Q_4H_4$ (4)

Relación C/N de mezcla de la corriente de salida

$$R = C / N = C_4 / N_4 \quad (5)$$

Despeje ecuación (2)

$$\frac{Q_1C_1 + Q_2C_2 + Q_3C_3}{Q_4} = C_4 \quad (6)$$

Despeje ecuación (3)

$$\frac{Q_1N_1 + Q_2N_2 + Q_3N_3}{Q_4} = N_4 \quad (7)$$

Al dividir la ecuación (6) y (7), se obtiene la igualdad de la relación C/N deseada.

$$\frac{Q_1C_1 + Q_2C_2 + Q_3C_3}{Q_1N_1 + Q_2N_2 + Q_3N_3} = R \quad (8)$$

Se obtiene la siguiente expresión, al ser incorporadas las humedades de cada material (en base húmeda):

$$R = \frac{Q_1C_1(100-H_1) + Q_2C_2(100-H_2) + Q_3C_3(100-H_3)}{Q_1N_1(100-H_1) + Q_2N_2(100-H_2) + Q_3N_3(100-H_3)} \quad (9)$$

Se establece un promedio de las humedades de los materiales iniciales.

$$H = \frac{Q_1M_1+Q_2M_2+Q_3M_3}{Q_1+Q_2+Q_3} \quad (10)$$

Se realiza una demostración del despeje de cantidad de material, Q3 (poda de césped)

$$Q_3 = \frac{RQ_1N_1(100-H_1)+RQ_2N_2(100-H_2)-Q_1C_1(100-H_1)-Q_2C_2(100-H_2)}{C_3(100-H_3)-RN_3(100-H_3)}$$

ANEXO E.

FORMATOS DE MEDICIONES DE TEMPERATURA Y pH

Mediciones temperatura reactor 1 (°C)										
	Ubicación	1			2			3		
Fecha	Altura (cm)	15	20	30	15	20	30	15	20	30
06/10/2018		24	24	25	24	25	25	23	24	24
07/10/2018		27	27	28	28	28	28	28	28	28
08/10/2018		33	33	33	32	33	33	33	33	34
09/10/2018		35	35	35	35	36	37	35	36	36
10/10/2018		41	42	42	41	42	43	41	41	42
11/10/2018		42	43	43	43	44	44	42	42	42
12/10/2018		41	41	42	42	42	42	41	41	41
13/10/2018		41	41	42	41	43	43	41	42	42
14/10/2018		38	38	38	38	38	38	38	39	39
15/10/2018		37	38	38	38	38	39	37	37	38
16/10/2018		37	37	37	37	37	37	36	36	37
17/10/2018		37	38	38	38	37	38	37	37	38
18/10/2018		37	37	37	37	37	37	36	36	37
19/10/2018		35	36	36	35	36	36	35	35	35
20/10/2018		36	36	36	36	36	36	36	36	37
21/10/2018			37	37		36	37		36	36
22/10/2018			36	35		36	36		35	36
23/10/2018			37	37		37	38		36	37
24/10/2018			35	36		36	36		36	36
25/10/2018			34	35		35	35		34	34
26/10/2018			33	34		34	34		33	33
27/10/2018			35	35		34	35		34	35
28/10/2018			33	34		34	34		33	34
29/10/2018			34	34		34	35		35	35
30/10/2018			33	33		33	34		33	33
31/10/2018			32	33		33	33		32	33
01/11/2018			31	32		32	32		31	31
02/11/2018			35	35		36	36		35	36
03/11/2018			38	39		38	39		38	38
04/11/2018			41	42		43	44		42	42
05/11/2018			41	42		42	42		41	41
06/11/2018			36	37		37	37		36	37
07/11/2018			36	36		36	36		35	36
08/11/2018			34	34		35	35		34	35
09/11/2018			33	33		33	34		33	33
10/11/2018			29	30		30	30		30	30
11/11/2018			25	24		25	25		24	25
12/11/2018			24	24		24	25		23	24
13/11/2018			22	23		23	23		22	23
14/11/2018			21	22		22	22		22	22

Mediciones temperatura reactor 2 (°C)										
	Ubicación	1			2			3		
Fecha	Altura (cm)	15	20	30	15	20	30	15	20	30
06/10/2018		23	24	24	24	24	25	23	23	24
07/10/2018		26	27	27	27	28	28	27	27	28
08/10/2018		32	32	33	33	33	34	32	33	33
09/10/2018		34	35	35	35	35	36	35	35	35
10/10/2018		40	41	41	42	42	43	41	41	42
11/10/2018		41	41	42	43	43	44	42	42	43
12/10/2018		41	41	41	42	42	42	41	41	42
13/10/2018		40	41	41	41	41	42	40	40	41
14/10/2018		37	37	38	38	38	38	37	37	37
15/10/2018		37	37	38	38	38	39	37	37	37
16/10/2018		37	37	37	36	37	37	36	37	37
17/10/2018		37	37	38	37	38	38	37	37	37
18/10/2018		36	36	37	36	37	37	36	36	37
19/10/2018		36	36	36	35	36	36	35	35	35
20/10/2018		34	35	35	36	36	36	35	35	35
21/10/2018			36	36		37	37		36	36
22/10/2018			35	35		36	36		35	36
23/10/2018			35	36		36	37		35	35
24/10/2018			34	35		36	36		35	36
25/10/2018			34	34		35	35		34	34
26/10/2018			34	34		34	35		34	34
27/10/2018			33	34		34	35		33	33
28/10/2018			33	34		34	34		34	34
29/10/2018			33	34		34	35		34	35
30/10/2018			33	33		34	34		33	34
31/10/2018			32	33		33	33		32	33
01/11/2018			31	31		32	32		31	31
02/11/2018			34	35		35	36		35	35
03/11/2018			37	38		38	39		37	38
04/11/2018			41	42		42	43		41	41
05/11/2018			42	42		43	43		42	42
06/11/2018			37	38		38	38		37	37
07/11/2018			37	36		36	37		35	36
08/11/2018			35	34		35	35		34	34
09/11/2018			33	33		34	34		33	33
10/11/2018			29	29		30	30		29	30
11/11/2018			25	25		25	26		24	24
12/11/2018			23	24		24	24		22	23
13/11/2018			23	23		23	24		22	22
14/11/2018			21	22		21	22		21	21

Mediciones temperatura reactor 3 (°C)										
	Ubicación	1			2			3		
Fecha	Altura (cm)	15	20	30	15	20	30	15	20	30
06/10/2018		24	24	24	24	24	24	23	23	23
07/10/2018		26	27	27	27	28	28	27	27	27
08/10/2018		32	32	33	33	33	33	32	32	32
09/10/2018		35	36	36	36	36	37	35	35	36
10/10/2018		42	42	42	42	43	43	41	42	42
11/10/2018		42	43	43	43	44	44	42	42	43
12/10/2018		41	42	42	42	43	44	42	42	43
13/10/2018		40	41	41	42	42	43	41	41	42
14/10/2018		39	39	38	39	40	40	38	39	39
15/10/2018		38	38	38	39	39	39	38	38	39
16/10/2018		37	37	37	39	39	40	37	37	38
17/10/2018		37	38	38	38	38	38	36	37	37
18/10/2018		36	36	36	36	37	37	35	35	36
19/10/2018		35	35	36	36	36	36	35	35	35
20/10/2018		36	36	36	36	36	36	35	35	36
21/10/2018			36	37		37	37		36	36
22/10/2018			36	36		37	37		36	36
23/10/2018			35	36		36	37		35	35
24/10/2018			35	36		36	36		36	36
25/10/2018			35	35		35	36		34	34
26/10/2018			34	34		35	35		33	34
27/10/2018			33	34		33	34		33	33
28/10/2018			33	33		34	34		33	33
29/10/2018			34	34		35	35		34	35
30/10/2018			33	34		34	34		33	33
31/10/2018			32	32		32	33		32	32
01/11/2018			30	31		31	32		30	30
02/11/2018			34	34		36	36		34	35
03/11/2018			38	38		39	39		38	38
04/11/2018			41	42		43	43		41	41
05/11/2018			42	42		42	42		41	42
06/11/2018			35	36		37	38		36	37
07/11/2018			35	35		36	36		35	36
08/11/2018			33	34		34	35		34	34
09/11/2018			33	33		33	34		32	33
10/11/2018			30	30		31	32		30	30
11/11/2018			26	25		26	26		25	25
12/11/2018			24	25		24	25		24	24
13/11/2018			23	23		22	23		22	23
14/11/2018			21	21		21	22		21	22

Formato medición temperatura promedio (°C)						
Tiempo (días)	Altura (cm)					
	15	cv	20	cv	30	cv
1	23,56	0,19	23,89	0,38	24,22	0,51
2	27,00	0,58	27,44	0,19	27,67	0,33
3	32,44	0,19	32,67	0,33	33,11	0,38
4	35,00	0,33	35,44	0,38	35,89	0,51
5	41,22	0,38	41,78	0,51	42,22	0,19
6	42,22	0,19	42,67	0,58	43,11	0,19
7	41,44	0,19	41,67	0,58	42,11	0,77
8	40,78	0,38	41,33	0,67	41,89	0,51
9	38,00	0,67	38,33	1,00	38,33	0,67
10	37,67	0,58	37,78	0,51	38,33	0,33
11	36,89	0,69	37,11	0,51	37,44	0,77
12	37,11	0,19	37,44	0,19	37,78	0,19
13	36,11	0,51	36,33	0,33	36,78	0,38
14	35,22	0,19	35,56	0,19	35,67	0,00
15	35,56	0,51	35,67	0,33	35,89	0,51
16			36,33	0,00	36,56	0,19
17			35,78	0,51	35,89	0,38
18			35,78	0,77	36,44	0,77
19			35,44	0,38	35,89	0,19
20			34,44	0,19	34,67	0,33
21			33,78	0,38	34,11	0,38
22			33,56	0,69	34,22	0,69
23			33,44	0,19	33,78	0,38
24			34,11	0,38	34,67	0,00
25			33,22	0,19	33,56	0,19
26			32,22	0,19	32,78	0,38
27			31,00	0,58	31,33	0,33
28			34,89	0,38	35,33	0,33
29			37,89	0,51	38,44	0,19
30			41,67	0,33	42,22	0,38
31			41,78	0,51	42,00	0,33
32			36,56	0,69	37,22	0,38
33			35,67	0,33	36,00	0,33
34			34,22	0,51	34,44	0,19
35			33,00	0,33	33,33	0,00
36			29,78	0,51	30,11	0,51
37			25,00	0,58	25,00	0,33
38			23,56	0,51	24,22	0,51
39			22,44	0,19	23,00	0,00
40			21,22	0,38	21,78	0,19

pH Reactores												
	Reactor 1			Reactor 2			Reactor 3			Promedio de cada reactor		
Día	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	pH1	pH2	pH3
1	6,9	6,9	6,9	6,8	6,8	6,8	7,0	7,0	7,0	6,90	6,80	7,00
2	5,7	5,7	5,9	5,6	5,5	5,5	5,3	5,6	5,3	5,74	5,54	5,39
3	5,4	5,3	5,3	5,3	5,2	5,3	5,2	5,3	5,4	5,34	5,27	5,31
4	5,5	5,6	5,5	5,6	5,4	5,6	5,4	5,5	5,5	5,52	5,53	5,47
5	6,3	6,4	6,6	6,6	6,1	6,3	6,4	6,4	6,2	6,43	6,36	6,37
6	6,5	6,5	6,4	6,4	6,6	6,5	6,5	6,4	6,4	6,47	6,50	6,43
7	6,7	6,8	6,6	6,8	6,7	6,6	6,5	6,6	6,7	6,70	6,70	6,60
8	6,9	7	6,8	6,9	6,9	7,1	7	6,8	6,7	6,90	6,97	6,83
9	7,1	7,2	7	6,9	7	7	7,1	7,2	7,2	7,10	6,97	7,17
10	7,0	7,4	7,3	7,3	7,4	7,3	7,4	7,3	7,4	7,26	7,33	7,37
11	7,4	7,4	7,4	7,2	7,4	7,2	7,7	7,4	7,4	7,39	7,27	7,49
12	7,4	7,5	7,5	7,3	7,3	7,4	7,7	7,5	7,4	7,47	7,34	7,52
13	7,5	7,4	7,4	7,5	7,4	7,3	7,6	7,5	7,5	7,43	7,38	7,53
14	7,6	7,5	7,3	7,5	7,4	7,4	7,6	7,6	7,6	7,46	7,42	7,60
15	7,7	7,6	7,8	7,7	7,6	7,8	7,6	7,7	7,7	7,70	7,71	7,67
16	7,7	7,8	7,9	7,7	7,6	7,9	7,7	7,7	7,8	7,80	7,73	7,73
17	7,8	7,9	7,8	7,9	7,8	7,8	7,7	7,9	7,7	7,83	7,85	7,77
18	7,9	7,8	7,9	7,9	7,9	8,0	7,9	8,1	7,9	7,87	7,92	7,96
19	8,0	8,1	7,8	7,8	8,0	8,0	8,0	7,9	8,0	7,96	7,94	7,96
20	8,2	8,2	8,2	8,0	8,2	8,2	8,3	8,1	8,0	8,20	8,13	8,14
21	8,2	8,4	8,2	8,3	8,3	8,4	8,3	8,4	8,3	8,27	8,33	8,29
22	7,9	7,7	7,9	7,8	7,8	7,9	7,8	7,8	7,9	7,81	7,83	7,83
23	7,7	7,7	7,6	7,7	7,7	7,7	7,6	7,5	7,6	7,66	7,70	7,57
24	7,7	7,6	7,6	7,7	7,6	7,7	7,5	7,6	7,5	7,62	7,66	7,53
25	7,5	7,6	7,6	7,6	7,7	7,6	7,5	7,6	7,6	7,57	7,60	7,58
26	7,4	7,4	7,5	7,5	7,6	7,5	7,5	7,6	7,5	7,44	7,50	7,52
27	6,4	6,3	6,3	6,2	6,2	6,3	6,3	6,3	6,4	6,32	6,24	6,31
28	5,8	6,1	5,8	5,8	6,2	6,0	6,1	5,8	6,0	5,92	6,00	5,95
29	6,3	6,5	6,4	6,4	6,3	6,3	6,3	6,4	6,4	6,40	6,34	6,34
30	6,5	6,7	6,8	6,6	6,7	6,7	6,7	6,6	6,6	6,66	6,67	6,62
31	6,7	6,6	6,4	6,7	6,8	6,5	6,6	6,5	6,6	6,55	6,67	6,58
32	6,8	6,6	6,5	6,6	6,6	6,7	6,9	6,6	6,5	6,63	6,63	6,67
33	6,9	6,8	6,7	6,8	6,8	6,6	6,8	6,7	6,7	6,79	6,73	6,73
34	7,0	6,9	7,1	6,9	7,1	6,9	6,9	7,1	7,1	7,00	6,97	7,03
35	7,0	7	7,1	7,02	6,9	7,03	7,05	7,08	7,1	7,04	6,98	7,08
36	7,2	7,3	7,4	7,4	7,3	7,3	7,2	7,3	7,3	7,30	7,33	7,27
37	7,3	7,4	7,2	7,3	7,2	7,4	7,3	7,3	7,3	7,31	7,30	7,30
38	7,4	7,4	7,4	7,5	7,4	7,5	7,5	7,3	7,4	7,39	7,47	7,40
39	7,4	7,4	7,5	7,2	7,3	7,4	7,4	7,3	7,3	7,44	7,30	7,33
40	7,4	7,4	7,3	7,4	7,3	7,4	7,4	7,4	7,4	7,38	7,37	7,40

ANEXO F.
MINERALES APLICADOS AL ABONO ORGÁNICO

Urea (46% N)



Roca fosfórica (P₂O₅: 20-22%; CaCO: 30-32%)



Cloruro de potasio



ANEXO G.

FLUJO DE CAJA NETO EVALUADO EN 10 AÑOS

Periodo (año)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos		52000000	53872000	55811392	57820602	59902143	62058620	64292731	66607269	69005131	71489316
Ahorro disposición residuos		14107200	14615059	15141201	15686285	16250991	16836026	17442123	18070040	18720561	19394502
Total ingresos		66107200	68487059	70952593	73506886	76153134	78894647	81734854	84677309	87725692	90883817
Egresos											
Insumos		17710117	18347681	19008198	19692493	20401423	21135874	21896765	22685049	23501711	24347772
Mano de obra		20422872	21468547	22570688	23732344	24956730	26247233	27607423	29041063	30552119	32144773
Servicios industriales		853110	883822	915640	948603	982752	1018131	1054784	1092756	1132096	1172851
Mantenimiento		2054040	2127985	2204592	2283958	2366180	2451363	2539612	2631038	2725755	2823882
producto		3744518	3879321	4018976	4163659	4313551	4468839	4629717	4796387	4969057	5147943
Total egresos		-44784659	-46707358	-48718096	-50821059	-53020638	-55321442	-57728303	-60246295	-62880740	-65637224
Depreciación		-10270200	-10270200	-10270200	-10270200	-10270200	-10270200	-10270200	-10270200	-10270200	-10270200
Intereses (12,46%)		-6.277.986	-5.022.389	-3.766.792	-2.511.194	-1.255.597					
Utilidades antes de impuesto		15044555	16757312	18467706	20174633	21876899	23573205	24006551	24431014	24844952	25246593
Impuesto de renta (33%)		4964703	5529913	6094342	6657628	7219376	7779157	7922161	8062234	8198834	8331375
Utilidades después de impuestos		10079852	11227399	12373363	13517004	14657522	15794047	16084389	16368779	16646118	16915217
Depreciación		10270200	10270200	10270200	10270200	10270200	10270200	10270200	10270200	10270200	10270200
Flujo Operativo		20350052	21497599	22643563	23787204	24927722	26064247	26354589	26638979	26916318	27185417
Amortización crédito		-6341400	-6341400	-6341400	-6341400	-6341400					
Financiación	31707000										
Inversión (-)	63414000										

Flujo de caja neto	31707000	14008651	15156199	16302162	17445804	18586322	26064247	26354589	26638979	26916317	27185417
-----------------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

*En pesos (\$)