

DISEÑO DE UN TAMBOR PERFORADO DE MEZCLA PARA EL PROCESO DE
COMPOSTAJE AEROBIO REALIZADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE LA
CENTRAL GANADERA DE MEDELLÍN

KARLA ANDREA OSSA VÁSQUEZ

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2008

DISEÑO DE UN TAMBOR PERFORADO DE MEZCLA PARA EL PROCESO DE
COMPOSTAJE AEROBIO REALIZADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE LA
CENTRAL GANADERA DE MEDELLÍN

KARLA ANDREA OSSA VÁSQUEZ

Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero de Procesos

Asesor

Marta Ruth López
Ingeniera Agrónoma

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2008

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, 9 de octubre de 2008

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración especial de las siguientes personas e instituciones:

Mi familia

Central Ganadera S.A.

Julio Santamaría Ortiz

Ing. Marta Ruth López

Ing. Santiago Correa Vélez

GEMI-Grupo de Investigación- Estudios de Mantenimiento Industrial

GIEM- Grupo de Interdisciplinario de Estudios Moleculares

Taller Corte y Grafado-Diseños en Acero y Aluminio

CONTENIDO

	Pág.
1. OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 CENTRAL GANADERA DE MEDELLÍN	14
2.1.1 La feria de ganados.	14
2.1.2 Planta de beneficio.	14
2.1.3 Frigorífico.	15
2.1.4 Subasta.	15
2.2 COMPOSTAJE	16
2.2.1 Etapas del compostaje.	16
2.2.2 Factores clave.	17
2.2.3 Sistemas abiertos.	18
2.2.4 Sistemas cerrados.	20
3. METODOLOGÍA	24
3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS ETAPAS DE COMPOSTAJE	24
3.1.1 Estandarización de las camas.	24
3.1.2 Medición de humedad y densidad.	25
3.1.3 Medición de la temperatura.	26
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ETAPAS DEL COMPOSTAJE	26
3.2.1 Organolépticos.	27

3.2.2	Fisicoquímicos.	27
3.2.3	Microbiológicos.	28
3.2.4	Tamaño de partícula.	29
3.2.5	Fitotóxicos.	29
3.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR PERFORADO DE MEZCLA	29
3.3.1	Determinación del volumen del tambor.	33
3.3.2	Determinación del tamaño de la lámina para la construcción del tambor.	34
3.3.3	Determinación de la transmisión del motor.	35
3.3.4	Determinación de la relación de poleas.	37
3.3.5	Selección del eje y chumaceras.	38
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
4.1	IDENTIFICACIÓN DE ETAPAS DE COMPOSTAJE MEDIANTE MEDICIONES DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y DENSIDAD	41
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS ETAPAS DE COMPOSTAJE	45
4.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR	45
4.4	PRUEBAS TAMBOR	46
5.	CONCLUSIONES	53
6.	RECOMENDACIONES	55
7.	BIBLIOGRAFÍA	56
7.1	CLÁSICA	56
7.2	CIBERGRAFÍA	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Feria de Revoltura.	14
Figura 2. Frigorífico - planta de beneficio.	15
Figura 3. Subasta.	15
Figura 4. Temperatura y fases del proceso de compostaje.	17
Figura 5. Compostaje en tambor.	21
Figura 6. Compostaje en tunel.	22
Figura 7. Dimensiones de una cama estándar para La Central Ganadera de Medellín.	24
Figura 8. Barra de acero.	40
Figura 9. Chumacera SKF.	40
Figura 10. Compostaje tradicional por camas.	41
Figura 11. Días de compostaje vs. temperatura.	42
Figura 12. Días de compostaje por cama vs. porcentaje de humedad.	43
Figura 13. Días de compostaje por cama vs. densidad.	43
Figura 14. Diagrama de bloques – Etapas del compostaje aerobio por camas de la Central Ganadera de Medellín.	44
Figura 15. Tambor perforado de mezcla.	47
Figura 16. Tambor perforado de mezcla con carga de rumen.	47
Figura 17. Comparación de perfiles de temperatura tambor perforado de mezcla vs. Cama de prueba #34.	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Equipos de compostaje disponibles en el mercado	30
Tabla 2. Datos y resultados de cálculos para la determinación del volumen del tambor.	34
Tabla 3. Datos y cálculos para la determinación del tamaño de la lámina para la construcción del tambor.	35
Tabla 4. Dimensiones calculadas a partir de la nueva longitud de la lámina para la construcción del tambor.	35
Tabla 5. Datos y cálculos para la determinación de la transmisión del motor	36
Tabla 6. Datos y cálculos para la determinación de la relación de poleas.	37
Tabla 7. Datos y cálculos para la selección del eje y chumaceras.	39
Tabla 8. Comparación de composición garantizada.	50

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Resumen de los análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos llevados a cabo para realizar la caracterización de las etapas del procesos de compostaje de la Central Ganadera de Medellín.	61
Anexo 2. Tabla comercial de barras de acero	63
Anexo 3. Hoja técnica tambor perforado de mezcla.	64
Anexo 4. Registros de porcentaje de humedad de las camas de compostaje.	65
Anexo 5. Registros de densidad de las camas de compostaje.	66
Anexo 6. Registros de temperatura de las camas de compostaje de prueba.	67
Anexo 7. Registros de temperatura de las camas de compostaje aleatorias de prueba.	69
Anexo 8. Plano de ensamble inicial del tambor perforado de mezcla.	70
Anexo 9. Plano del diseño inicial del tambor.	71
Anexo 10. Plano del diseño inicial de la manzana.	72
Anexo 11. Plano del diseño inicial del eje.	73
Anexo 12. Plano del diseño inicial de la placa soporte para las chumaceras.	74
Anexo 13. Plano del diseño inicial del soporte del tambor.	75
Anexo 14. Plano del diseño inicial de la placa soporte del motor.	76
Anexo 15. Plano de ensamble del diseño inicial del tambor.	77
Anexo 16. Plano del diseño final del soporte del tambor.	78
Anexo 17. Plano del diseño final de la placa de soporte del motor.	79
Anexo 18. Plano del diseño final del tambor.	80
Anexo 19. Registro de pruebas de temperatura para el tambor y la cama de prueba #34.	81

RESUMEN

En este trabajo se diseñó y construyó un tambor perforado de mezcla para la optimización del proceso de compostaje aerobio realizado en la Central Ganadera de Medellín.

Para el diseño se identificaron previamente las etapas de compostaje de este proceso, mediante mediciones de humedad, densidad y temperatura; se caracterizó cada una de ellas mediante análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos. Además se identificaron los materiales y sistemas de volteo más usados en el compostaje a nivel mundial.

A continuación se llevó a cabo la construcción del equipo teniendo en cuenta el punto anterior y se realizaron las pruebas de campo.

Por medio de los resultados de las pruebas se realizó una comparación entre los parámetros exigidos por el Instituto Colombiano Agropecuario ICA (según la norma NTC 5167) a los productores de acondicionadores orgánicos de suelos.

Finalmente se comprobó mediante la operación del tambor perforado de mezcla que este logro optimizar el proceso aerobio de la Central Ganadera de Medellín mejorando los volteos, y con estos el contacto entre componentes, el secado, el tiempo de compostaje y el esfuerzo físico de los empleados de la planta.

Palabras claves: compostaje, compostaje aerobio, camas de compostaje, rumen, tambor de mezclado, acondicionador orgánico de suelos, Termófilos, mesófilos.

INTRODUCCIÓN

El artículo 72 del decreto 1594 de 1984, Usos del Agua y Residuos Líquidos, establece las normas de vertimiento a un cuerpo de agua, allí se dispone que la remoción de sólidos suspendidos en los vertimientos debe ser del 80%, parámetro que se estaba incumpliendo en La Central Ganadera de Medellín. Todo el barrido de bovinaza procedente de los corrales de la feria de ganados y, el contenido ruminal y agua-sangre de la planta de sacrificio eran arrojados al río Medellín, generando un impacto ambiental considerable.

Por la razón anteriormente expuesta y los costos que se generarían por el posible pago de la tasa retributiva, desde hace algunos años la Central Ganadera de Medellín viene realizando labores de compostaje como solución ambiental a este problema de contaminación.

El proceso de compostaje para la obtención de un acondicionador orgánico de suelos realizado en la Central Ganadera de Medellín, es un proceso aerobio, estructurado bajo el modelo tradicional (Madrigal, 2005). Este se desarrolla en fases mesófilas (15 a 45 °C) y termófilas (45 a 70 °C) con una duración de dos a tres meses. Está organizado mediante 51 camas de compostaje con un peso aproximado por cama de 9 toneladas en la fase inicial y 3 toneladas en el producto terminado, es decir, un acondicionador orgánico de suelos.

Semanalmente, todas las camas deben ser volteadas para garantizar el contacto de todos los componentes del compost (Bovinaza seca, contenido ruminal, cal dolomita y cisco de madera) y el secado del material orgánico. Estos volteos son realizados por 5 personas con la ayuda de palas de construcción, lo cual impide que el proceso sea óptimo (Álvarez, 2005).

Aunque el proceso de compostaje aerobio por camas, para todo tipo de residuos orgánicos, es uno de los más usados y económicos, en este proyecto se plantea el diseño de un tambor perforado de mezcla como alternativa para la optimización del proceso ya que se mejora el sistema de volteo obteniendo una mezcla más homogénea, donde todos los componentes entran en contacto, se disminuye el tiempo de secado y de esta forma el tiempo de compostaje, también se podrán controlar los olores y la presencia de moscas, y finalmente el esfuerzo físico que tiene que realizar el personal de la planta se reduce mejorando así sus condiciones laborales.

El tambor perforado es una opción adicional dentro de la oferta de equipos de compostaje disponible actualmente en el mercado.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un equipo que permita mejorar el proceso de compostaje que se realiza en la planta de beneficio de la central ganadera de Medellín, por medio de la caracterización del proceso.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las etapas del proceso de compostaje de la Central Ganadera de Medellín evaluando la temperatura, humedad, peso, volumen y densidad de cada una de las camas de compostaje mediante mediciones directas y cálculos de muestras recolectadas.
- Caracterizar cada una de las etapas de compostaje identificadas mediante análisis fisicoquímico, fitotóxico, microbiológico, metales pesados y de tamaño de partícula, evaluando así la pérdida de propiedades a través del proceso.
- Identificar las principales características, como materiales y sistemas de volteo, que ofrecen los equipos de mezcla para compostaje disponibles en el mercado mediante una búsqueda de compañías productoras de esta tecnología con el fin de adaptarlas al diseño del tambor perforado.
- Diseñar y construir un prototipo de un tambor perforado de mezclado a escala de laboratorio que permita mejorar el proceso de compostaje específico de la planta de beneficio de la central ganadera de Medellín, optimizando el proceso de volteo del material.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CENTRAL GANADERA DE MEDELLÍN

La Central Ganadera de Medellín es una empresa dedicada a la prestación de servicios al sector ganadero y cárnico, y está ubicada en el municipio de Bello, Antioquia. Sus servicios están estructurados en 4 bloques principales: feria de ganados, planta de beneficio, frigorífico y subasta (Central Ganadera S.A., 2008).

2.1.1 La feria de ganados.

Es el sitio de comercialización de ganado gordo cebado (bovinos machos y hembras), ganado flaco para cría, levante ó engorde, cerdos para sacrificio, y ganado de revoltura, es decir, equinos, ganados tipo leche, machos y hembras de levante que es exhibido cada miércoles en las instalaciones de la feria de ganados. En la feria además se desarrollan negocios asociados con la actividad ganadera tales como talabarterías, comisionistas, transportadores, entre otros (Central Ganadera S.A., 2008).

Figura 1. Feria de Revoltura.



(Central Ganadera S.A., 2008)

2.1.2 Planta de beneficio.

Es una de las mejores del país por su organización, controles y tecnificación. Ofrece los servicios de beneficio de reses y cerdos, y el lavado de mondongo y entresijos (Central Ganadera S.A., 2008).

Además cuenta con una planta de compostaje para la obtención de acondicionador orgánico de suelos a partir de residuos orgánicos sólidos y líquidos provenientes del proceso de sacrificio, como *rumen* (contenido estomacal de bovinos), contenido estomacal e intestinal de porcinos y estiércol (bovinaza y porcínaza) recogida en los diferentes corrales (Central Ganadera S.A., 2008).

2.1.3 Frigorífico.

Cuenta con un servicio de refrigeración y almacenamiento de carne en canal, con 15 cavas cámaras frigoríficas independientes construidas con tecnología de punta y bajo estrictos controles de higiene y temperatura. Tienen una disponibilidad de almacenamiento de 540 bovinos y 900 porcinos (Central Ganadera S.A., 2008).

Figura 2. Frigorífico - planta de beneficio.



(Central Ganadera S.A., 2008)

2.1.4 Subasta.

La subasta permite la compra y venta pública de bovinos mediante competencia directa y presentando la mejor oferta. Esta se realiza todos los martes en las instalaciones de la Feria de Ganados de Medellín (Central Ganadera S.A., 2008).

Figura 3. Subasta.



(Central Ganadera S.A., 2008)

2.2 COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso biológico aeróbico, mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia orgánica (restos de cosecha, podas, excrementos de animales y residuos urbanos) permitiendo la liberación de los nutrientes útiles o compost, para su empleo en la agricultura, mejorando la estructura del suelo, ayudando a reducir la erosión, mejorando la absorción de agua y nutrientes sin que provoque fenómenos adversos (Madrigal, 2005).

En general, este proceso se puede describir de acuerdo con la siguiente reacción química (De Assas Gaupp, Dandachli et Al, 2008):

Materia Orgánica + Microorganismos \rightarrow CO₂ + CH₄ + Microorganismos + NH₄ + P + Biomasa (materia orgánica convertida)

2.2.1 Etapas del compostaje.

El proceso de compostaje está dividido en etapas según la evolución de la temperatura (Madrigal, 2005).

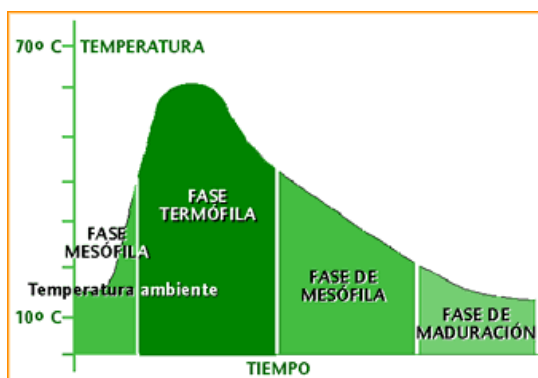
- Mesófila: La masa vegetal esta a temperatura ambiente y los microorganismos mesófilos se multiplican rápidamente. Como consecuencia de la actividad metabólica la temperatura se eleva y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH (Madrigal, 2005).
- Termófila: Cuando se alcanza una temperatura de 40 °C, los microorganismos termófilos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco y el pH del medio se hace alcalino. A los 60 °C estos hongos termófilos desaparecen y aparecen las bacterias esporígenas y actinomicetos. Estos microorganismos son los encargados de descomponer las ceras, proteínas y hemicelulosa (Madrigal, 2005).
- De enfriamiento o de mesófila: Cuando la temperatura es menor de 60 °C, reaparecen los hongos termófilos que reinvasen el mantillo y descomponen la

celulosa. Al bajar de 40 °C los mesófilos también reinician su actividad y el pH del medio desciende ligeramente (Madrigal, 2005).

- De Maduración: Es un periodo que requiere meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización del humus (Madrigal, 2005).

En la figura 4 se observa la curva teórica de temperatura durante las diferentes etapas de compostaje.

Figura 4. Temperatura y fases del proceso de compostaje.



(FUNDASES, 2007)

2.2.2 Factores clave.

Dentro de estas etapas se deben tener en cuenta factores como:

- Humedad: La gestión biológica de los microorganismos requiere de agua para la formación de su biomasa. Se necesita de una humedad alta al principio del proceso cuando la actividad es más intensa y un poco menos a medida que se avanza en la descomposición. Se busca inicialmente del 30% al 70% de humedad y ello se alcanza con la humedad propia de los compostables en su adecuada mezcla o añadiendo agua. Cada mezcla tiene un punto óptimo. Para materiales fibrosos o residuos forestales gruesos la humedad máxima

permisible es del 75% al 85% mientras que para material vegetal fresco, ésta oscila entre el 50% al 60% (Gómez, 2000).

En los procesos donde se hacen volteos para reactivar el proceso, se acostumbra a rehumedecer y entonces la temperatura se eleva de nuevo. Las humedades muy altas pueden conducir a procesos anaeróbicos provocando la putrefacción de la materia orgánica (Gómez, 2000).

- Aireación: Para que el proceso se desarrolle en condiciones aeróbicas, los microorganismos deben disponer de oxígeno suficiente, lo cual se logra mediante la aireación. La concentración del oxígeno dependerá del tipo de material, textura, humedad y frecuencia de volteo y de la presencia o ausencia de aireación forzada (Madrigal, 2005).
- Temperatura: La temperatura comienza con una rápida elevación, a causa del metabolismo de los microorganismos. Se debe realizar un control de la temperatura con el fin de evitar la calcinación de los materiales en proceso de transformación y garantizar la eliminación de patógenos y la inhabilitación de semillas de malas hierbas, procurando un material inocuo a la hora de su aplicación en el campo. (FUNDASES, 2007)

2.2.3 Sistemas abiertos.

- Compostaje en superficie: Consiste en esparcir sobre el terreno una capa delgada de material orgánico, dejándolo descomponerse y penetrar poco a poco en el suelo. Este material sufre una descomposición aerobia y asegura la cobertura y protección del suelo, sin embargo las pérdidas de nitrógeno son mayores, pero son compensadas por la fijación de nitrógeno atmosférico (InfoAgro, 2006).
- Compostaje por camas (pilas estáticas): Este método es el más económico y utilizado. En esta tecnología los materiales se amontonan sobre el suelo, sin comprimirlos y controlando la forma y medida de la pila o cama (Madrigal, 2005; Wehrhahn, 2006).

La ventilación de las pilas se realiza por convección natural. El aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados. La forma y tamaño óptimo de la pila depende del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición, todo lo cual afecta el movimiento del aire hacia el centro de la pila (Madrigal, 2005; Wehrhahn, 2006).

Si las pilas son demasiado grandes, el oxígeno no puede penetrar en el centro, mientras que si son demasiado pequeñas no calentarán adecuadamente, y la descomposición será poco efectiva. El tamaño óptimo varía con el tipo de material y la temperatura ambiente (Madrigal, 2005; Wehrhahn, 2006).

Una vez constituida la pila, la única gestión necesaria es el volteo, ya sea manual o mezclado con una máquina adecuada. Su frecuencia depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que se desea realizar el proceso, siendo habitual realizar un volteo cada 6 - 10 días. Los volteos sirven para homogeneizar la mezcla y su temperatura, a fin de eliminar el excesivo calor, controlar la humedad y aumentar la porosidad de la pila para mejorar la ventilación. Después de cada volteo, la temperatura desciende del orden de 5 a 10 °C, subiendo de nuevo en caso que el proceso no haya terminado (Madrigal, 2005; Wehrhahn, 2006).

- Compostaje por camas ventiladas: Para este sistema se acomodan los materiales sobre un conjunto de tubos perforados o una solera porosa, conectados a un sistema que aspira o introduce aire a través de la pila. Al conformar la pila no se vuelve a tocar sino hasta que la etapa activa de compostaje sea completada; cuando la temperatura en el material excede el óptimo, unos sensores que controlan el ventilador lo activan para que inyecte el aire necesario para enfriar la pila abasteciéndola de oxígeno (Wehrhahn, 2006).

En este caso no hay mecanismos para mezclar el material durante el proceso de compostaje, las pilas estáticas ventiladas se usan para materiales homogéneos como los fangos, que mezclados con un substrato seco y poroso como astillas de madera o aserrín, forman una película líquida delgada en la que tiene lugar la descomposición (Wehrhahn, 2006).

Este sistema permite la rápida transformación de residuos orgánicos en fertilizantes. La ventilación controlada impulsa la actividad de los microorganismos artífices del proceso de compostaje. El sistema es también más económico por la poca intervención mecánica que se requiere. La capacidad del compostaje varía según el número de unidades de soplador y su tipo de modelo, así como también la naturaleza de los residuos orgánicos a tratar (Wehrhahn, 2006).

El proceso suele durar unas 4 - 8 semanas, y luego se apila el producto durante 1 - 2 meses para que acabe de madurar. Puede usarse en combinación con otras tecnologías de compostaje. Con un adecuado pretratamiento de los residuos orgánicos, el exceso de humedad y las condiciones anaerobias de fermentación pueden reducirse (Wehrhahn, 2006).

2.2.4 Sistemas cerrados.

- Compostaje en tambor: El proceso de compostaje tiene lugar en un tambor de rotación lenta. Estos tambores pueden trabajar en continuo o por cargas y son de diferentes tamaños y formas. Están contruidos en acero y la mayoría de ellos incorporan aislamiento térmico, principalmente en países centroeuropeos y nórdicos (BioCycle, 2000; Wehrhahn, 2006).

El residuo orgánico, una vez pesado y registrado, es descargado en la zona de recepción. Desde aquí se deposita, mediante pala cargadora sin más preparación, directamente al alimentador de los tambores de compostaje. La

alimentación del residuo y su distribución dentro del tambor se realiza de forma totalmente automática (BioCycle, 2000; Wehrhahn, 2006).

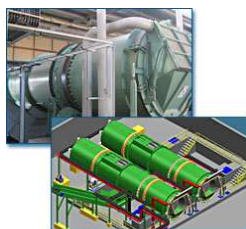
El proceso de descomposición tiene lugar dentro del tambor de compostaje. Gracias a la rotación intermitente de la unidad de compostaje, el material es desembrollado, homogeneizado y desfibrilado de forma selectiva con un resultado óptimo (Anónimo, 2003; Wehrhahn, 2006).

Las emisiones de olor, las cuales alcanzan máximos al principio de la descomposición, son extraídas por el sistema de ventilación del tambor y dirigidas a un biofiltro para su eliminación. El líquido de los residuos liberado durante la transformación de las sustancias orgánicas, es re-alimentado al residuo orgánico por la rotación intermitente del sistema, manteniéndose dentro del mismo (Madrigal 2005, InfoAgro, 2006).

Al final del ciclo, el material dispone de un óptimo grado de homogeneización, está desembrollado, no tiene ningún olor desagradable, es inocuo en lo que se refiere a la higiene humana, y tiene un contenido óptimo de humedad para la eliminación de contaminantes y para el compostaje secundario (reducción de agentes patógenos) (Gómez, 2000; InfoAgro, 2006).

En la figura 5 se observa un sistema industrial de tambores rotatorios, con su respectivo sistema de carga y extractor de olores.

Figura 5. Compostaje en tambor.



(RosRoca, 2007)

- Compostaje en túnel: El proceso tiene lugar en un túnel cerrado, generalmente fabricado en hormigón, con una vía de ventilación controlada por impulsión o aspiración, para el aporte de oxígeno. En este caso el residuo se encuentra estático y el proceso es completo (Wehrhahn, 2006).

En la figura 6 se observa un túnel de compostaje. Está compuesto por una serie de reactores construidos en concreto, dotados de una puerta para la carga y descarga de material mediante el uso de una cargadora de ruedas, un sistema de aireación que toma aire exterior mediante un ventilador helicoidal en la parte inferior y un sistema de succión en la parte superior que extrae el aire para ser tratado antes de liberarlo al ambiente.

Figura 6. Compostaje en tunel.



(RosRoca, 2006)

- Compostaje en silos: Es una técnica similar a la del compostaje por túnel, la diferencia reside en que en este sistema el compostaje se realiza en contenedores de acero, redondos o cuadrados, generalmente de menor tamaño que los túneles de hormigón; estos están perforados por los lados para permitir una buena aireación. A menudo es un proceso en continuo, con carga del material a compostar en la parte superior y descarga por la parte inferior (Wehrhahn, 2006).

- Compostaje en nave: El proceso de compostaje tiene lugar en una nave cerrada, localizada bajo tierra. La ventilación se realiza mediante una placa en la base y/o con ayuda de diferentes tipos de unidades rotativas (volteadoras). Las plantas modernas están totalmente automatizadas y equipadas con volteadoras, las cuales se mueven por medio de grúas elevadoras y pueden alcanzar el compostaje total del área de la nave (Wehrhahn, 2006).

3. METODOLOGÍA

Los análisis y pruebas realizadas para este proyecto se llevaron a cabo en el laboratorio de Química Orgánica de la Universidad EAFIT y en la Universidad de Antioquia a través del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares - GIEM.

Los planos para la construcción del tambor perforado de mezcla se realizaron con el apoyo del Grupo de Investigación en Estudios de Mantenimiento Industrial GEMI de la Universidad EAFIT y las correcciones de planos y construcción del prototipo en el taller Corte y Grafado-Diseños en Acero y Aluminio.

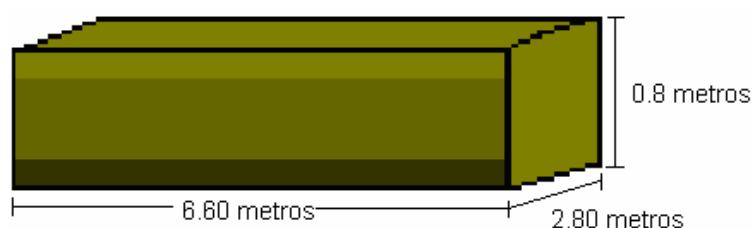
3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS ETAPAS DE COMPOSTAJE

El proceso de identificación de las etapas de compostaje se realizó en 3 pasos: estandarización de las camas de compostaje, medición de humedad y densidad, y medición de temperatura.

3.1.1 Estandarización de las camas.

Se seleccionó una muestra aleatoria de 10 camas, donde se midió con una cinta métrica el ancho, alto y profundidad. Cada una de las dimensiones presentaba variaciones de 10 cm. por lado. En la Figura se observan las dimensiones establecidas como estándar para el compostaje de la Central Ganadera de Medellín.

Figura 7. Dimensiones de una cama estándar para La Central Ganadera de Medellín.



El volumen total de cada cama fue de 14.78 m^3 .

3.1.2 Medición de humedad y densidad.

De las camas seleccionadas previamente se recolectó una muestra de 1 Kg por cama, tomando material tanto de la superficie como del interior, para realizar pruebas de humedad y densidad. La prueba de humedad en campo no fue realizada ya que no se disponía de un higrómetro especializado para este tipo de material.

Para la medición de la humedad se realizó mediante secado en horno, es decir se tomó la muestra seca para expresar el resultado en base húmeda. Se depositó cada una de las muestras en un beaker de 250 ml, se midió la masa en una balanza electrónica marca Adventurer Ohaus y posteriormente se llevó a un horno de secado marca Heraus a una temperatura de 70°C por 24 Horas. Una vez finalizado el secado se procedió a pesar nuevamente las muestras. La humedad se calculó así:

$$\%H = \frac{\text{Minicial} - \text{Mfinal}}{\text{Minicial}} \times 100\%$$

Donde:

%H: La humedad de la muestra

Minicial: Masa húmeda de la muestra

Mfinal: Masa seca de la muestra

La muestra seca se tomó nuevamente para medir la densidad, esto se realizó cuantificando la masa de producto depositado libremente por unidad de volumen, en un recipiente de volumen conocido, en este caso una probeta de 50 cm³; estos ensayos se realizaran de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 5167 (Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo)

3.1.3 Medición de la temperatura.

Para la medición de temperatura se seleccionaron dos camas, la N° 34 y la N° 43, ya que en el momento de iniciar la prueba eran las que se encontraban comenzando el proceso de compostaje. Estas fueron evaluadas por un periodo de 3 meses; también se adicionó una medición en camas aleatorias pero siguiendo el proceso de compostaje, desde la fase mesófila hasta la fase de maduración. La temperatura se midió mediante un termómetro bimetalico marca Hawk el cual se dejó por aproximadamente 1 minuto en cada uno de los 3 puntos de medición; el valor final fue el promedio de las 3 mediciones.

Finalmente las etapas del proceso fueron identificadas con estos datos y se realizó un diagrama de bloques que permite visualizar fácilmente el proceso realizado en la Central Ganadera de Medellín.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ETAPAS DEL COMPOSTAJE

Para caracterizar las etapas del proceso de compostaje se realizaron análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos (Ver Anexo 1)

Estos análisis se efectuaron en la Universidad de Antioquia a través del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares - GIEM y teniendo en cuenta la norma técnica colombiana NTC 5167 (Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo).

En total se realizaron 3 análisis: fase mesófila, fase intermedia (Combinación de las etapas termófila y de enfriamiento) y fase de maduración.

3.2.1 Organolépticos.

Se realizó una valoración cualitativa mediante la percepción de los sentidos. Para este caso se analizaron los parámetros de estado, color y textura de la muestra (NTC 5167, 2004)

3.2.2 Fisicoquímicos.

Se basan en metodologías de análisis de suelos y de material vegetal debido a que la aplicación directa del producto final es sobre el suelo o como sustrato para siembra. Los ensayos realizados son los siguientes:

- Cuantificación de la capacidad de retención de agua, pH y conductividad eléctrica: En esta prueba se adicionó agua a la muestra hasta un punto de equilibrio que refleja un brillo metálico sobre la superficie, en el cual la muestra no absorbe más agua ni la escurre; después de un tiempo de reposo se registraron el volumen de agua utilizado para alcanzar el punto de saturación, el peso de la muestra seca y el porcentaje de humedad, con lo que se obtuvo el porcentaje de saturación. El pH se midió sobre esta misma muestra usando un potenciómetro y obteniendo una lectura directa del equipo. Para la conductividad eléctrica, se separó una parte de la muestra, se le aplicó una filtración al vacío, y con la ayuda de un conductímetro se midió la conductividad eléctrica del filtrado expresada en dS/m (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de cenizas por el método de pérdidas por volatilización: Es una aproximación del contenido de materia orgánica presente en el producto, considerando que el 100% del producto menos el tope del porcentaje de cenizas, carbonatos y humedad refleja el contenido de materia orgánica (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de Carbonatos: Se realizó por medio de la adición de un volumen en exceso de una solución normalizada de ácido clorhídrico, el cual reacciona con los carbonatos presentes. El exceso de ácido se valoró con una solución de hidróxido de sodio normalizada (NTC 5167, 2004).

- Cuantificación del carbono orgánico oxidable total: Se realizó por el método de Walkley Black y se fundamenta en la reducción del ión dicromato y el contenido de carbono se midió por el ión dicromato no reducido; es un método indirecto, por lo que está sujeto a interferencias tales como cloruros (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C): Se usó el método del acetato de amonio 1N pH 7.0, este se basa en el reemplazo de las posiciones de intercambio por el ión amonio y su posterior desplazamiento con una solución de cloruro de sodio, produciendo cloruro de amonio el cual en presencia de un formaldehído forma estequiométricamente un complejo nitrogenado y ácido clorhídrico el cual se evaluó con hidróxido de sodio (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de fósforo y potasio: Se usó el método de mineralización por vía seca. Por este método es posible cuantificar fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, cobre, manganeso, zinc, boro y azufre (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de metales pesados: Se realizó por medio de mineralización de la muestra en una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico y se evaluó por absorción atómica (NTC 5167, 2004).

3.2.3 Microbiológicos.

Los análisis microbiológicos se realizan para cuantificar e identificar microorganismos patógenos que contaminan las muestras y son perjudiciales para el ser humano (Agrobiotek, 2008).

- Enriquecimiento, asilamiento y detección de Salmonella: a la muestra se le adicionó un caldo lactosado el cual pasó por un periodo de incubación de 24 a 48 horas y se tomó una muestra que se extiende sobre medios de cultivo sólidos (agar Bismuto Sulfito o agar Salmonella-Shingella). La muestra no debe tener el microorganismo (NTC 5167, 2004).

- Recuento total de microorganismos mesofilos facultativos: Se mezcló la muestra con agua petonada y se realizó la siembra. El resultado se obtuvo calculando el número de colonias visibles por gramo de muestra (NTC 5167, 2004).
- Recuento total de hongos o levaduras: Se mezcló la muestra con agua petonada y se realizó la siembra. El resultado se obtuvo calculando el número de hongos y levaduras visibles por gramo de muestra (NTC 5167, 2004).
- Recuento de Enterobacterias: Se mezcló la muestra con agua petonada, luego se realizó la siembra, se agregó cristal violeta rojo neutro – bilis – glucosa y se incubaron. El resultado se realizó calculando el número de Enterobacterias visibles por gramo de muestra (no debe exceder 1000) (NTC 5167, 2004)

3.2.4 Tamaño de partícula.

Se usó la técnica de tamizado con malla de alambre tejido número 10 (2mm) (NTC 5167, 2004).

3.2.5 Fitotóxicos.

Se realizaron pruebas donde se determina el efecto de la muestra sobre la germinación de semillas de acuerdo con el modelo biológico *Raphanus sativus* (NTC 5167, 2004).



3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR PERFORADO DE MEZCLA

El compostaje tradicional por camas presenta ventajas y desventajas como cualquier sistema. Dentro de las ventajas encontramos la baja inversión en cuanto a construcción, un secado rápido por la producción de altas temperaturas, manejo de altos volúmenes de material y un producto estable a nivel físico y químico para su posterior adición al suelo. Se consideran como desventajas significativas la gran cantidad de espacio necesario para realizar el proceso, la vulnerabilidad a los cambios ambientales y la dificultad para el volteo de las camas, siendo esta última una de las razones para la realización de este proyecto.

Para el diseño del tambor perforado de mezcla se consideraron las características, materiales y sistemas de volteo presentados por equipos de compostaje disponibles en el mercado. En la tabla 1 se observa un resumen de los equipos de compostaje.

Tabla 1 Equipos de compostaje disponibles en el mercado

Tecnología	Materiales Construcción	Volteo	Características	Ventajas	Desventajas
Patio Tumbler  (Green Cultur Inc., 2006)	Polietileno de alta densidad y tubería de acero	Palas interiores	Compostaje aerobio, ventanas de aireación, ruedas para transporte y, una sola carga y descarga	Fácil de transportar, bajo costo	Aireación limitada
Black barrel compost tumbler  (Green Cultur Inc., 2006)	Plástico reciclado	Manual en sitio	Compostaje aerobio, una sola carga y descarga	Sistema de aireación central interno, bajo costo	Esfuerzo para el volteo
Archetype Compost Tumbler  (Green Cultur Inc., 2006)	Lámina galvanizada y acero tubular	Con manivela	Compostaje aerobio, una sola carga y descarga.	Pines internos adheridos a las paredes del tambor, bajo costo	Difícil de transportar
Windrow turner	Acero al carbono	Paleta dentada	Compostaje aerobio.	Homogenización del material	Únicamente para sistemas de camas, alto costo

 <p>(Recycle and composting equipment, 2008)</p>					
<p>Rotoking Compost Turner</p>  <p>(Transform compost systems, 2008)</p>	-	Paletas intercaladas	Automatizada	Homogenización del material	Alto montaje y costos
<p>Covered aerated static pile composting</p>  <p>(Enviros Consulting, 2008)</p>	Mallas de nylon y tubería perforada.	Inyección forzada de aire; no hay volteo	Bomba de desplazamiento positivo para la inyección de aire debajo de las camas. Compostaje aerobio	Se ubica directamente sobre la pila	Consumo de energía
<p>Containerized Vessel</p>  <p>Engineered compost systems (2008).</p>	Acero inoxidable	Mezclador interno	Compostaje aerobio por medio de inyección de aire y control automático del proceso	Control de las propiedades, proceso en un solo lugar	Consumo de energía, espacio, infraestructura.
<p>Tunnel composting</p>  <p>(American Bio Tech, 2008).</p>	Concreto y acero	Pala mecánica interna	Sistema interno de aireación y control de olores y humedad	Control de las propiedades, proceso en un solo lugar	Consumo de energía, espacio, infraestructura.

De acuerdo con la información anterior y la teoría de compostaje se decidió continuar con un proceso aerobio, ya que su manejo es el más sencillo y más usado de los sistemas de compostaje (Haug, 1993).

Se planteó entonces para el proceso realizado en la Central Ganadera de Medellín, el diseño de un contenedor, en este caso uno que permitiera continuar con el compostaje aerobio. La forma que más se adaptaba para hacer una mezcla homogénea del material era la de un cilindro en este caso un tambor de mezclado. Para garantizar la aireación del material se propuso el uso de perforaciones en la superficie del tambor, en vez de ventanas de aireación como se observa en la información de la tabla 1. El volteo se estableció mediante la rotación del tambor perforado conectado mediante un sistema de poleas conducidas a un motorreductor, y este a su vez conectado a un suiche on/off que permitiera la fácil operación del equipo por parte de los empleados.

Tomando como referencia la tabla 1 los materiales más usados en los equipos de compostaje disponibles en el mercado mundial son concreto, polietileno, plástico reciclado y acero, este último seleccionado para la construcción del tambor perforado de mezcla por su costo y adaptabilidad a la forma del equipo (Clean Merseyside Centre, 2005).

Para la carga y descarga se destaca el uso de estructuras simples, como ventanas, característica que fue identificada y adaptada para este proyecto (Green Culture Inc., 2006).

Al finalizar la identificación de las características de los sistemas de compostaje comerciales se procedió a realizar el diseño del tambor perforado de mezcla. Este se llevó a cabo mediante teoría para diseño mecánico, donde se calculó el volumen del tambor, el tamaño de la lámina para la construcción del tambor, la transmisión del motor y la relación de poleas, además se seleccionaron tanto el motor como el eje y las chumaceras asociados al eje. Posteriormente esta

información se introdujo al software Inventor donde se establecieron las dimensiones del tambor perforado de mezcla y se realizaron los planos iniciales de construcción (Ver anexos 8 al 15). Finalmente los planos fueron ajustados (Ver anexos 16 al 18) en el taller Corte y Grafado-Diseños en Acero y Aluminio, donde se llevo a cabo la construcción del tambor.

3.3.1 Determinación del volumen del tambor.

Según reglas heurísticas, el volumen de material contenido en un tambor cilíndrico debe ser equivalente a la tercera parte del volumen total del tambor. Para este caso se usaron dos fórmulas, la primera para hallar el volumen de un cuerpo y la segunda para hallar el volumen total del tambor (Stewart, 1999)

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

V : Volumen de materia prima.

m : masa de la materia prima.

ρ : Densidad de la materia prima.

En este caso la materia prima es rumen, con una humedad mayor al 80%

$$V_{TOTAL} = 3 * V$$

Donde:

V_{TOTAL} : Volumen total del tambor.

V : Volumen de materia prima.

En la Tabla 2 se presentan los datos y resultados de los cálculos realizados a partir de las fórmulas mencionadas anteriormente.

Tabla 2. Datos y resultados de cálculos para la determinación del volumen del tambor.

Variable	Nombre	Unidades	Valor
m	Masa Materia Prima	Kg	5
ρ	Densidad Materia Prima	Kg/m ³	50
V	Volumen Materia Prima	m ³	0,1
V_{TOTAL}	Volumen Total Tambor	m ³	0,3

Se consideró que una muestra de 5 Kg. era óptima tanto para la realización de las pruebas como para construir un tambor perforado de mezcla a pequeña escala.

La densidad de la materia prima se obtuvo a través de los análisis fisicoquímicos realizados para la identificación de las etapas de compostaje. Ver anexo 1.

3.3.2 Determinación del tamaño de la lámina para la construcción del tambor.

Para calcular el tamaño de la lámina para la construcción del tambor fue necesario determinar el diámetro del tambor a partir del volumen total del mismo; con este dato junto con la longitud del tambor (que se fijó teniendo en cuenta que el tambor sería construido a pequeña escala), se calculó el tamaño de la lámina mediante la fórmula de perímetro (Stewart, 1999).

$$d = \sqrt{\frac{4 * v}{\pi * L}}$$

Donde:

d : Diámetro del tambor.

V_{TOTAL} : Volumen total del tambor.

L : Longitud del tambor.

$$P = \pi * d$$

Donde:

P : Perímetro de la lámina.

d : Diámetro del tambor.

En la Tabla 3 se presentan los datos y resultados de los cálculos realizados a partir de las fórmulas mencionadas anteriormente.

Tabla 3. Datos y cálculos para la determinación del tamaño de la lámina para la construcción del tambor.

Variable	Nombre	Unidades	Valor
L	Longitud	m	1
d	Diámetro Tambor	m	0,618
P	Perímetro (Largo de la lámina)	m	1,236

Debido a que comercialmente no se fabrican láminas de 1.236 m de largo se seleccionó una lámina perforada de acero Hot Rolled de 2 m de largo, 2 mm de espesor, con perforaciones de 6mm de diámetro y un área libre de 45%.

Con el cambio de longitud de la lámina, el diámetro del tambor pasa de 0,618 m a 0,60m, cambiando así el perímetro, el volumen total del tambor, el volumen de la materia prima y la masa de la materia prima, que fueron recalculados. Los cambios en las dimensiones se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones calculadas a partir de la nueva longitud de la lámina para la construcción del tambor.

Variable	Nombre	Unidades	Valor
d	Diámetro Tambor	m	0.600
P	Perímetro (Largo de la lámina)	m	1.88
V_{TOTAL}	Volumen Total Tambor	m ³	0.283
V	Volumen Materia Prima	m ³	0.094
m	Masa Materia Prima	Kg	4.71

3.3.3 Determinación de la transmisión del motor.

Para calcular la transmisión del motor era necesario conocer la inercia generada por el tambor, su aceleración angular y el torque producido por el movimiento del mismo (Beer, 1993).

$$I = \frac{M}{2} * r^2$$

Donde:

I : Inercia.

M : Suma de la masa de la materia prima y la masa del tambor.

r : Radio del tambor.

$$\tau = I * \omega$$

Donde:

τ : Torque.

I : Inercia.

ω : Velocidad angular.

En la Tabla 5 se presentan los datos y resultados de los cálculos realizados a partir de las fórmulas mencionadas anteriormente.

Tabla 5. Datos y cálculos para la determinación de la transmisión del motor

Variable	Nombre	Unidades	Valor
M	Suma de la masa de la materia prima y la masa del tambor	Kg	29,12
r	Radio del tambor	m	0,300
I	Inercia	Kg.m ²	1,3104
ω	Velocidad angular	Rad/s	0,52
τ	Torque	N.m	0,6814

La masa del tambor se calculó a partir de los datos comerciales de la lámina perforada (Ferrocortes, 2001).

La velocidad angular se determinó considerando que el tambor debía girar lentamente, en este caso a 5 RPM, debido al tipo de materia prima y a que el volteo debe ser cuidadoso para no disminuir la temperatura bruscamente, y de esta forma mantener vivos los microorganismos correspondientes, según la etapa del proceso de compostaje en el que se encuentre el tambor.

El torque obtenido indica que la potencia necesaria para mover el tambor perforado de mezcla es muy baja, por lo tanto se debe seleccionar un motor pequeño. De acuerdo con la oferta del mercado, se seleccionó el motorreductor marca ASSI SK01 63 S/4, pues presenta el torque máximo mas bajo, con un valor de 91 N.m y que presenta una potencia de 0,16 hp (Variadores S.A., 2006).

3.3.4 Determinación de la relación de poleas.

La relación de poleas se determinó a partir de la velocidad de salida del motorreductor y la velocidad deseada de giro del tambor.

$$R = \frac{V_s}{v}$$

Donde:

R : Relación de poleas.

V_s : Velocidad de salida del motorreductor.

v : Velocidad deseada de giro del tambor.

En la Tabla 6 se presentan los datos y resultados de los cálculos realizados a partir de la fórmula mencionada anteriormente.

Tabla 6. Datos y cálculos para la determinación de la relación de poleas.

Variable	Nombre	Unidades	Valor
R	Relación de poleas	-	5.6
V_s	Velocidad de salida del motorreductor	RPM	28
v	Velocidad deseada de giro del tambor	RPM	5

La relación de poleas obtenida indica que es una polea conducida. De acuerdo con el radio del tambor, y la distancia estimada de ubicación del tambor con respecto al suelo, el sistema de poleas que se ajustó a la relación calculada fue: una polea de 14 pulgadas y otra de 3 pulgadas respectivamente.

3.3.5 Selección del eje y chumaceras.

En el mercado existe gran variedad de ejes y chumaceras, que se ajustaban al diseño del tambor, por lo que no fue necesario hacer cálculos de diseño, pero sí de selección (Beer, 1993).

Para la selección de eje se evaluó el acero al carbono 4140; por sus propiedades mecánicas y alto uso industrial en piezas rotatorias era adecuado para la operación del tambor (Ferrocortes, 2001).

La selección se realizó a partir de las siguientes fórmulas:

$$\tau_{\max} = \frac{S_y}{2}$$

Donde:

τ_{\max} : Torque máximo del material.

S_y : Esfuerzo de fluencia a la tensión del material.

Con el torque máximo del material se procede a calcular el torque, incluyendo la potencia del motorreductor seleccionado.

$$T = \frac{P}{2\pi f}$$

Donde:

T : Torque generado por el tambor.

P : Potencia del motorreductor.

f : Frecuencia.

Con esta información se precedió a calcular la relación J/C que me permite seleccionar el eje a través de tablas comerciales de barras de acero (Ferrocortes, 2001).

$$\frac{J}{C} = \frac{T}{\tau_{\max}}$$

Donde:

J : Momento polar de inercia.

C : Diámetro de la barra.

T : Torque generado por el tambor.

τ_{\max} : Torque máximo del material.

Con el valor de la relación J/C se buscó en las tablas comerciales el radio (C) correspondiente a la barra de acero al carbono 4140 que se ajustaba a este diseño. Además se tuvo en cuenta el peso de la barra con respecto al peso del tambor con carga (Ver anexo 2).

$$\frac{J}{C} = \frac{\pi * C^3}{2}$$

Donde:

C : Diámetro de la barra.

J : Momento polar de inercia.

En la Tabla 7 se presentan los datos y resultados de los cálculos realizados a partir de las fórmulas mencionadas anteriormente.

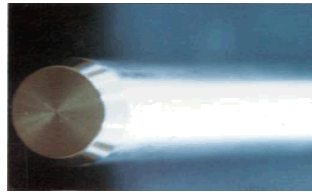
Tabla 7. Datos y cálculos para la selección del eje y chumaceras.

Variable	Nombre	Unidades	Valor
S_y	Esfuerzo de fluencia a la tensión del material	Kpsi	417
τ_{\max}	Torque máximo del material	Kpsi	30,5
P	Potencia del Motorreductor	hp	0,16
f	Frecuencia de giro del tambor	hz	0,0833
τ	Torque	Lb.pulgada	2017,62
J/C	Relación de momento polar de inercia con Diámetro de la barra de acero	Pulgada ³	0,0662
C	Diámetro de la barra (eje)	Pulgada	1

Con este procedimiento se seleccionó un eje calibrado de acero al carbono 4140 de 1 pulgada de diámetro.

Una vez seleccionado el eje se procedió con la selección de unas chumaceras marca SKF de 1 pulgada de diámetro.

Figura 8. Barra de acero.



(Acerinox, 2008)

Figura 9. Chumacera SKF.



(SKF, 2008)

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la identificación y caracterización del proceso de compostaje realizado en la Central Ganadera de Medellín, además del diseño y construcción del tambor perforado de mezcla y sus respectivas pruebas de campo.

4.1 IDENTIFICACIÓN DE ETAPAS DE COMPOSTAJE MEDIANTE MEDICIONES DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y DENSIDAD

Para la identificación de las etapas del proceso de compostaje se registraron las temperaturas de 2 camas (Ver Figura 10) por un periodo de 80 días.

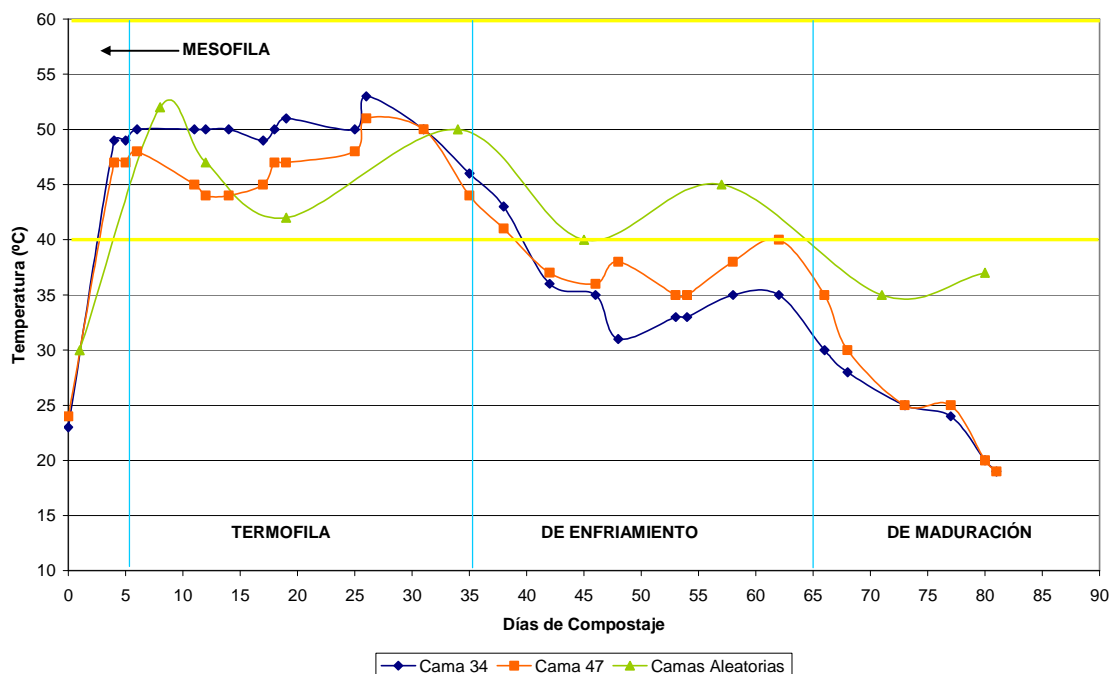
Adicionalmente se tomaron 10 muestras de camas aleatorias, en puntos correspondientes, a las cuales se les midió temperatura, humedad y densidad.

Figura 10. Compostaje tradicional por camas.



Al analizar las curvas de temperatura presentadas en la Figura 11. se encontró que las etapas del proceso de compostaje aerobio de la Central Ganadera de Medellín coinciden con la literatura de compostaje previamente consultada (Ver figura 4). Las etapas se dividen de la siguiente forma: la etapa mesófila va del día 0 al día 5 con un aumento de temperatura desde los 23°C a los 49 °C. A continuación se observa la etapa termófila que va del día 5 al 35, en ésta las temperaturas entraron en un periodo de oscilación, con tendencia a la estabilización, donde se dio un aumento debido a la acción de los microorganismos termófilos y una disminución por los volteos semanales (Madrigal, 2005). Posteriormente ocurrió la etapa de enfriamiento, que va de los días 35 a 65, y al igual que en la etapa anterior se presentaron oscilaciones, en este caso de forma descendente, ocupando un rango de temperaturas entre los 50°C y 32°C. La última etapa es la de maduración que transcurrió entre los días 65 y 80, con temperaturas entre los 48°C y 18°C (Madrigal, 2005).

Figura 11. Días de compostaje vs. temperatura.



En cuanto a los factores claves, puede observarse que la humedad y la densidad, están estrechamente relacionadas; a medida que el proceso de compostaje se lleva a cabo, la humedad disminuye por el secado del material, esto se debe al aumento de temperatura provocado por la degradación de la materia orgánica - principalmente en la etapa Termófila- y los volteos semanales (Madrigal, 2005). En consecuencia el peso de las camas disminuye al igual que su volumen, y por consiguiente su densidad aumenta. Este hecho se puede observar gráficamente por medio de la Figura 12 y la Figura 13, donde se observa todo el proceso de compostaje desde la materia prima, rumen, hasta su conversión en acondicionador orgánico de suelos (Abono).

Figura 12. Días de compostaje por cama vs. porcentaje de humedad.

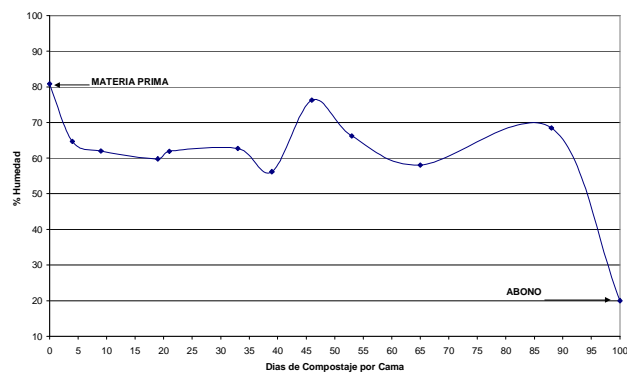
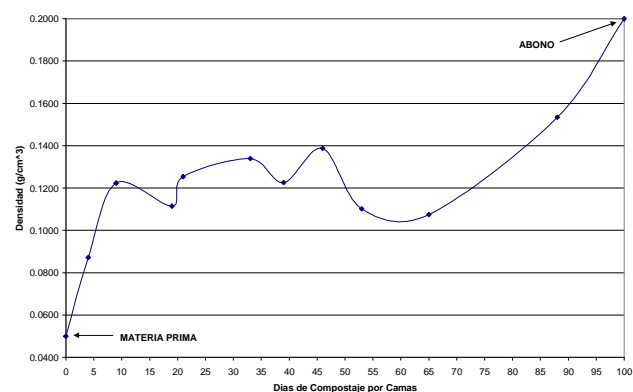
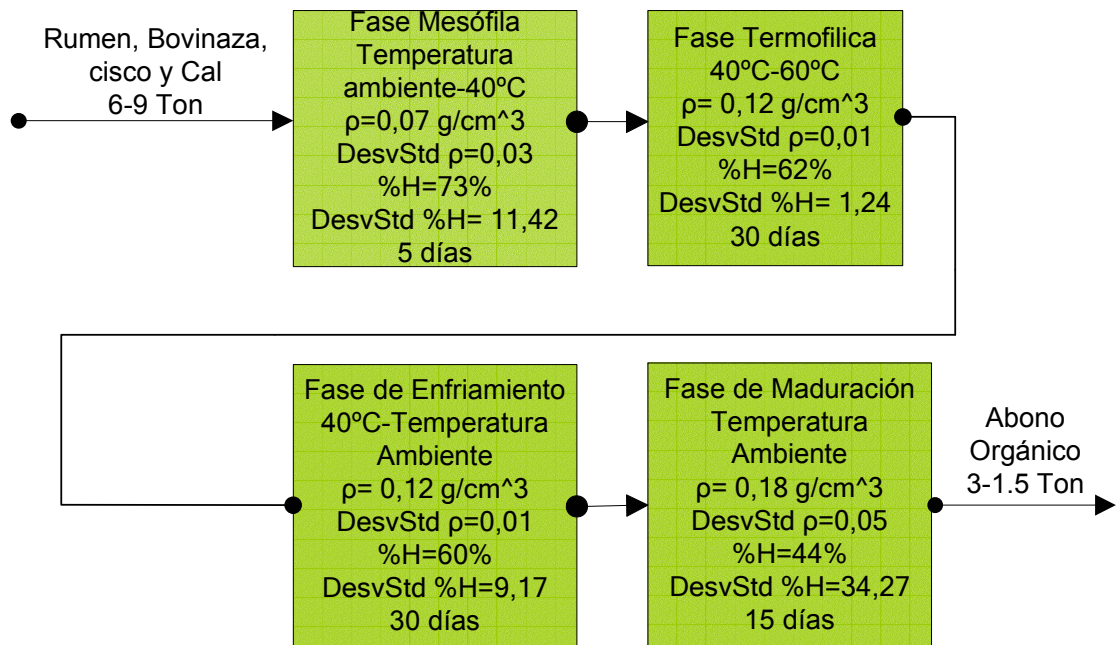


Figura 13. Días de compostaje por cama vs. densidad.



De acuerdo con en el análisis previo, se lograron identificar las etapas del proceso de compostaje de la Central Ganadera de Medellín. En la Figura 14. se pueden observar claramente las etapas, los rangos de temperatura asociados, y las humedades y densidades promedio respectivamente, con sus desviaciones estándar.

Figura 14. Diagrama de bloques – Etapas del compostaje aerobio por camas de la Central Ganadera de Medellín.



En la fase mesófila se observa un valor significativo de desviación estándar para la humedad, 11.24, esto se debe a que en esta fase el material entra con un porcentaje de humedad mayor al 80% y pierde humedad rápidamente con el aumento de temperatura. En la fase termófila la humedad se mantiene alrededor del 62%, es la etapa que mas estabilidad presenta, esto se debe también a que el cambio de temperatura es menor. En las fases de enfriamiento y maduración la desviación incrementa nuevamente por los cambios de temperatura,

presentándose desviaciones de 9.17 y 34.27 respectivamente. La densidad no presenta variaciones significativas por etapa, sin embargo desde la materia prima hasta el producto terminado, se incrementa en más del doble.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ETAPAS DE COMPOSTAJE

Según los análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos realizados por el grupo de Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares-GIEM de la Universidad de Antioquia y teniendo en cuenta la norma técnica colombiana NTC 5167 (Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo) se observó que las características organolépticas analizadas, es decir, color, estado y textura no presentaron variaciones a lo largo del proceso de compostaje (Ver Anexo 1).

Con respecto al análisis fisicoquímico, la cantidad de nitrógeno disminuye a lo largo del proceso por dos factores: en primera instancia las características innatas del material que se está compostando, en este caso rumen, el cual no posee un alto contenido de nitrógeno; y finalmente la descomposición misma del material, donde el nitrógeno se transforma en amoníaco que se libera al ambiente tanto en emisiones gaseosas como en forma de lixiviado.

Los metales pesados solo fueron detectados en cantidades que estaban muy por debajo de aquellos permitidos por la norma.

4.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR

Para la construcción del tambor se tuvieron en cuenta algunas consideraciones de diseño y fue necesario rediseñar algunas partes.

Por las dimensiones comerciales de la lámina, y el proceso de rolado para la fabricación del cilindro el diámetro paso de 0,618 m a 0.600 m. Este cambio implica en consecuencia una disminución en el volumen total del tambor y en la capacidad de carga.

Para la estructura se había considerado el uso de tubería rectangular de dimensiones 5X5 cm de 2,3 mm de espesor, sin embargo el taller Corte y Grafado-Diseños en Acero y Aluminio, donde se construyó el tambor perforado de mezcla, aportó al proyecto el material para la estructura, en este caso tubería rectangular de 6X4 cm calibre 18. Como consecuencia de esta modificación, se decidió cambiar la forma de la estructura, de triangular a rectangular, ya que mejoraba la estabilidad del tambor.

Para la disposición del motorreductor se rediseño la placa del soporte del motor, y se oriento en forma vertical, ya que de otra forma la polea no hubiera funcionado correctamente.

Finalmente las características definitivas del tambor se plasmaron en la hoja técnica del tambor perforado de mezcla (Ver Anexo 3).

4.4 PRUEBAS TAMBOR

El tambor perforado de mezcla fue llevado a la Central Ganadera de Medellín donde se realizaron las pruebas de temperatura respectivas, y al final del proceso se envió una muestra de producto terminado al Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares-GIEM de la Universidad de Antioquia para su caracterización. En la figura 15 se observa el tambor sin carga.

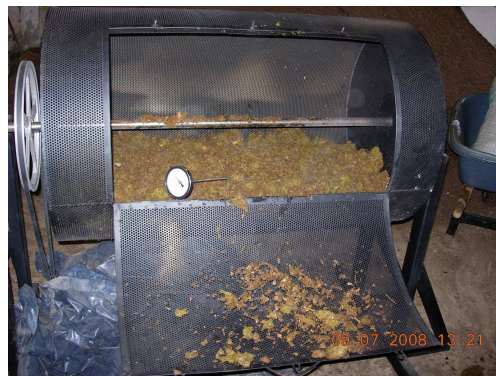
Figura 15. Tambor perforado de mezcla.



En el momento de introducir el rumen crudo al tambor se comprobó que tenía mayor capacidad que la calculada teóricamente, en vez de una muestra de 4,71 Kg se tomó una 47 Kg (Ver Figura 16).

En la figura 16 se observa el tambor perforado de mezcla cargado con rumen crudo, en el momento de la primera medición de temperatura.

Figura 16. Tambor perforado de mezcla con carga de rumen.



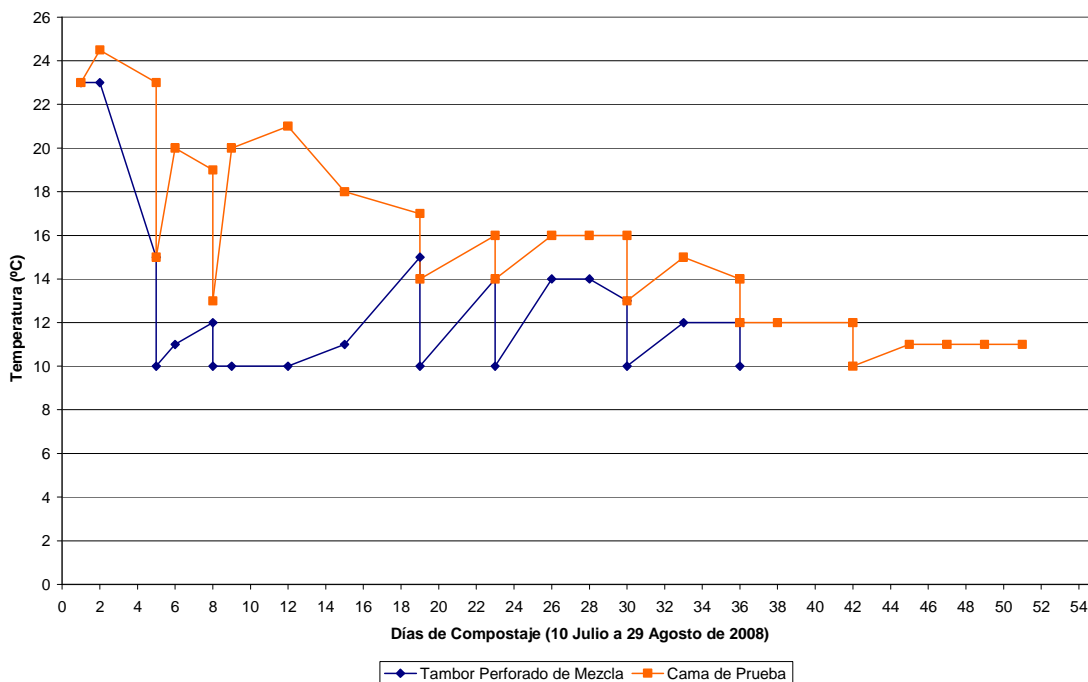
Al mismo tiempo se armó una cama de prueba con una masa igual a la muestra del tambor, es decir 47 Kg, y con unas dimensiones de 70X70X22 cm.

El compostaje se realizó por un periodo de 51 días, durante este tiempo se llevó un registro de las temperaturas, para identificar las etapas del compostaje para este caso específico.

El compostaje en el tambor perforado se dio por terminado a los 36 días, cuando se identificó experimentalmente que el olor, color y humedad del material de tambor correspondían a un proceso finalizado de compostaje. Teniendo en cuenta este hecho se tomó una muestra del tambor y se caracterizó bajo los mismos parámetros del proceso tradicional. El compostaje en la cama de prueba tuvo una duración de 51 días.

De acuerdo con los registros de temperatura se realizó una comparación de los perfiles de temperatura del tambor perforado de mezcla con los de la cama de prueba. Por medio de la Figura 17. se comprobó que la aireación del material fue mejor en el tambor que en la cama de prueba pues la temperatura, aunque presenta la misma tendencia, registró temperaturas mas bajas, entre 2°C a 11°C de diferencia. Vemos como disminuyó la temperatura después de cada volteo, esto se ve reflejado en la figura 17 por medio de las líneas verticales de los días 5, 8, 19, 23, 30, 36 y 42. También se observó que el compostaje aunque fue aerobio no presentó una etapa termófila, esto se debe a que el tamaño de la muestra considerada fue pequeño; esto cambia los parámetros finales del producto como acondicionador orgánico de suelos, específicamente con la aparición de patógenos. Cabe resaltar que el compostaje puede llevarse a cabo a temperaturas bajas pero lleva mas tiempo en descomponer el material orgánico (Haug, 1993)

Figura 17. Comparación de perfiles de temperatura tambor perforado de mezcla vs. Cama de prueba #34.



Además de lo anterior, el Instituto Colombiano Agropecuario-ICA exige a los productores de acondicionadores orgánicos de suelos garantizar ciertos parámetros de la composición del producto. Esto está establecido según la norma técnica colombiana NTC 5167 (Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo).

En la tabla 8 se hace una comparación de los valores correspondientes a los parámetros exigidos por el ICA, los valores que hasta el momento puede garantizar la Central Ganadera de Medellín, y los resultados tanto del proceso tradicional por camas como del tambor perforado de mezcla.

Tabla 8. Comparación de composición garantizada.

PARÁMETRO	UNIDADES	NTC 5167	CENTRAL GANADERA	CAMA	TAMBOR
Cenizas	%	Máximo 60%	32	33,45	20,33
Humedad	%	Máximo 20%	21	19,753	42,42
Carbono Orgánico Oxidable Total	%	Mínimo 15%	26	32,72	37,26
Capacidad de Intercambio Catiónico	meq/100 g	Mínimo. 30 meq /100 g	52	35,27	28,46
Capacidad de Retención de Humedad	%	Mínimo su propio peso	270	243,98	405,7
pH	-	Mayor a 4 y Menor que 9	6	7,04	7,38
Fósforo	%	Reportar valores mayores al 1%	1	0,563	0,978
Nitrógeno	%	Reportar valores mayores al 1%	2	1,83	1,34
Densidad	g/cm ³	Máxima 0,6 g/cm ³	0,2	0,27	0,1

La cantidad de cenizas cumple los parámetros exigidos por el ICA y la Central Ganadera de Medellín; en el tambor perforado el porcentaje de cenizas fue de 20,33%, menor que en el procesos por camas donde se obtuvo un valor de 33,45%. Esto se debe a que el proceso en el tambor se realizó a temperaturas bajas, minimizando la calcinación del material por el incremento de la temperatura.

La humedad en el tambor fue de 42,42%, significativamente mayor que en el proceso tradicional donde se obtuvo un 19,75%. Con respecto al valor que debe

ser garantizado se presentó una diferencia del 212%. Esto refleja que la muestra necesita de una fase de maduración mayor para que el acondicionador orgánico de suelos pueda ser incorporado a la tierra (Haug, 1993).

Lo anterior tiene estrecha relación con la capacidad de retención de humedad-CRA, que en este caso fue de 405,7% superior a la presentada por el compostaje tradicional donde se observa un valor de 243,98%. Ambos valores están dentro de los parámetros requeridos. Un buen porcentaje de CRA en un acondicionador orgánico de suelos permite que las plantas una vez tengan este material incorporado a su suelo, puedan absorber buena cantidad de agua para su crecimiento (Álvarez, 2005).

El carbono orgánico oxidable total esta dentro de los parámetros exigidos, sin embargo esta por encima del valor de las camas tradicionales, este hecho se debe a que los microorganismos presentados a bajas temperaturas, es decir los mesófilos, no alcanzan a consumir todo el carbono disponible, necesitan mas tiempo, es decir, el proceso necesitaba mas tiempo de maduración.

La capacidad de intercambio catiónico –CIC- se encuentra por debajo del valor exigido por la norma, la muestra presentó 28,46 meq/100g comparado con los 30 meq/100g de referencia. Sin embargo, la criticidad de este parámetro se observa cuando presenta valores inferiores a 11meq/100g pues su capacidad de retención de humedad es baja (no aplica en este caso) y hay mayor probabilidad de pérdidas de nitrógeno y potasio por lixiviación. El material puede aun puede usarse para acondicionamiento de suelos.

La norma establece que el pH de un acondicionador orgánico de suelos debe estar dentro de los límites de 4 a 9, la muestra está en 7,38. Un pH en este rango no afectará las condiciones del suelo o del cultivo. (NTC 5167, 2004)

Se encontró que el fósforo estaba en un 0,978%, alrededor del límite presentado en la norma que es 1%, esto indica que los microorganismos hacen uso de este compuesto para la degradación del material y además que parte de éste se pierde durante el proceso de compostaje.

La densidad del material compostado en el tambor es inferior a la de las camas proceso tradicional, esto al proceso de compostaje como tal y a la pérdida de humedad que se da por mayor contacto con el aire.

El nitrógeno se encuentra dentro de lo exigido por la norma que es mínimo 1%. La muestra presentó un valor de 1.34%.

5. CONCLUSIONES

Las mediciones de temperatura, humedad y densidad permitieron realizar la identificación de las etapas de compostaje aerobio por camas realizado en la Central Ganadera de Medellín de acuerdo con las características presentadas en la teoría de compostaje por camas.

La caracterización del proceso se ajustó a los parámetros exigidos por la norma NTC 5167 y la Central Ganadera de Medellín, excepto en términos de humedad y capacidad de intercambio catiónico-CIC. El valor máximo de la humedad debe estar en 20%, en el tambor perforado se presentó un valor de 42,42%, esto está relacionado con el alto porcentaje de capacidad de retención de humedad que en este caso fue de 405,7% mientras que en el proceso por camas se obtuvo un 243,98%. Con respecto a la capacidad de intercambio catiónico se observa que esta por debajo del mínimo requerido (30 meq/100g) presentando un valor de 28,46 meq/100g, esto me indica que como acondicionador orgánico de suelos disminuirá su capacidad para intercambiar nutrientes.

El tamaño de la muestra fue muy pequeño para alcanzar temperaturas de fase termófila por lo cual se observó la presencia de patógenos como la salmonella; esto era predecible pues la literatura establece que si se toman muestras pequeñas hay posibilidad de no alcanzar temperaturas termófilas. En este sentido no se cumplen las garantías de acondicionadores orgánicos de suelos requeridas por el ICA y al mismo tiempo por la Central Ganadera de Medellín.

El pH mostró una tendencia alcalina, esto se debe a la poca descomposición de proteínas; estas generan ácidos orgánicos que lo disminuyen manteniéndolo generalmente entre 6 y 7.

Se evidenció que los microorganismos no consumieron todo el carbono disponible en la materia orgánica del tambor perforado comparado con el proceso tradicional, hecho que se ve reflejado en el aumento de los valores de la relación carbono-nitrógeno, que pasa de 17,88 a 27,81 y carbono orgánico, que aumenta de 32,72% al 37,26%.

Los resultados del análisis fitotóxico del material compostado en el tambor perforado indican que la muestra procesada es apta para el acondicionamiento de suelos ya que presenta un porcentaje de germinación de material vegetal del 100%.

Con las perforaciones del tambor el tiempo de secado disminuyó ya que el área de contacto del material con el aire fue mayor comparada con la de la cama tradicional; el material de construcción del tambor presenta un área libre de 45%, que aumenta el área de contacto material-aire. El tiempo de compostaje se redujo en un 30%, mientras que el acondicionador orgánico de suelos se obtuvo en 36 días en el tambor, el de la cama de prueba tuvo un proceso de 51 días.

El esfuerzo de los operarios de la planta se vio altamente disminuido; el uso de palas de construcción para esta prueba piloto se vio limitado a dos momentos, carga y descarga. Los operarios expresaron su satisfacción al hacer uso del tambor perforado de mezcla pues se facilitaba el volteo del material.

Se presentó una disminución leve de los olores y la aparición de moscas sobre el compost.

Basado en lo anterior el diseño del tambor perforado de mezcla cumplió con los objetivos propuestos para este proyecto excepto con la aparición de salmonella, el alto porcentaje de humedad y la falta de capacidad de intercambio catiónico.

6. RECOMENDACIONES

Experimentar con diferentes intervalos de tiempo entre volteos con el objetivo de encontrar el rango de tiempo óptimo, que permita que el proceso alcance las temperaturas termófilas y de esta forma se descomponga adecuadamente la materia orgánica y eliminar la presencia de patógenos tales como la salmonella.

Realizar un mayor número de pruebas cambiando la ubicación del tambor perforado de mezcla para identificar el lugar de la planta que presente mejores condiciones de convección libre para el secado del compost.

Verificar el gasto energético mensual de acuerdo con la cantidad de volteos programados.

Reubicar el motor en el montaje ya que en el momento de cargar el tambor si el rumen esta muy húmedo, puede escurrir directamente sobre este. También se podría proteger con una caja acrílica.

Escalar el equipo para realizar el proceso con una cantidad mayor de materia prima, que garantice la fase termófila.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1 CLÁSICA

ÁLVAREZ LOPERA, Alonso. 2005. Proceso del Abono Orgánico. Documento Central Ganadera de Medellín. Medellín.

BEER, Ferdinand P. (1993). Mecánica de Materiales. México: Mcgraw-Hill. 738p.

GOMEZ ZAMBRANO, Jairo. 2000. Abonos Orgánicos. Cali: Universidad Nacional de Colombia. 105p.

HAUG, Roger T (1993). The Practical Handbook of Compost Engineering. USA: CRC Press. 717p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Productos para la Industria Agrícola. Productos Orgánicos Usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo. Primera Actualización. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2004, 40p. NTC 5167

MADRIGAL C. Alejandro. 2005. Notas Sobre Compostaje con Énfasis en el Caso Camposol S.A. Documento Central Ganadera de Medellín. Medellín.

STEWART, James. (1999). *Cálculo: Conceptos y Contextos*. México: International Thomson Editores. 728 p.

VARIADORES S.A. Catálogo de Motorreductores MR01-0704. Medellín:
VARIADORES S.A., 2006, 52p.

7.2 CIBERGRAFÍA

ACERINOX (2008) "Productos Largos-Barra Calibrada"

http://www.acerinox.es/opencms/export/sites/ACERINOX/Acerinox/largos_barra_calibrada.gif. Julio 12, 2008.

AGROBIOTEK (2008). "Análisis Microbiológicos"

http://www.agrobiotek.com/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=20.

Noviembre 8, 2008.

American Bio Tech (2008). "Túnel Composting". <http://www.abt-compost.com/tunnel.html>. American Bio Tech. 7 Noviembre, 2008

American Bio Tech (2008). "Túnel Composting". <http://www.abt-compost.com/tunnel.html>. American Bio Tech. 7 Noviembre, 2008

Anónimo (2003) "Organic Material In-Vessel Composting"

http://p2library.nfesc.navy.mil/P2_Opportunity_Handbook/7_II_A_3.html. US Navy Library. Abril 29, 2006

BioCycle (2000) "In-Vessel Composting of Residential Organics"

<http://www.environmental-expert.com/magazine/biocyclus/january2000/article2.htm>.

BioCycle Journal of Composting and Recycling. Abril 29, 2006

California Integrated Waste Management Board. (2006) "In-Vessel Compost

Technologies" <http://www.ciwmb.ca.gov/FoodWaste/Compost/InVessel.htm> #ECS.

California Integrated Waste Management Board. Mayo 6, 2006.

Central Ganadera S.A. (2008) "Quienes Somos-Misión, Visión y Valores"

<http://www.feriaganadosmedellin.com.co/quienes-mis-vis-val.htm>. Central

Ganadera S.A. Septiembre 6, 2008.

Central Ganadera S.A. (2008) "Planta de Beneficio"
<http://www.feriaganadosmedellin.com.co/planta-servicios.htm>. Central Ganadera S.A. Septiembre 6, 2008.

Central Ganadera S.A. (2008) "Subasta"
<http://www.feriaganadosmedellin.com.co/paginas-galeria/subasta2.htm>. Central Ganadera S.A. Septiembre 6, 2008.

Clean Merseyside Centre (2005) "Guide to Selecting an In-Vessel Composting System"
[http://www.envirolinknorthwest.co.uk/Envirolink/library0.nsf/0/5F43B213E63B179E8025724B004153E5/\\$file/In-vessel%20Guide.pdf](http://www.envirolinknorthwest.co.uk/Envirolink/library0.nsf/0/5F43B213E63B179E8025724B004153E5/$file/In-vessel%20Guide.pdf) Clean Merseyside Centre. Octubre 14, 2006

DE ASSAS GAUPP, Andrea; DANDACHLI, Dina et Al (2008). "Compostaje. i) Aerobio. ii) Biometanización (Compostaje Anaerobio)"
<http://www.cbm.uam.es/jlsanz/docencia/archivos/Resumen26.pdf>. Centro de Biología Molecular Severo Ochoa. Julio 12, 2008

Engineered compost systems (2008). "CV Composters"
http://www.compostsystems.com/cv_composter.html. Engineered compost systems. 7 Noviembre, 2008.

Enviros Consulting (2008). "Commercial Composting Systems"
http://www.compost.me.uk/html/composting_systems.html Enviros Consulting. Noviembre 7, 2008.

FUNDASES-Fundación de Asesorías para el Sector Rural, Minuto de Dios. (2007) "Factores Importantes-La Temperatura". <http://www.fundases.com/p/pub-compostaje02.html>. FUNDASES. Noviembre 3, 2007.

FUNDASES-Fundación de Asesorías para el Sector Rural, Minuto de Dios. (2007). "Compostaje con EM-Etapas del Compostaje". <http://www.fundases.com/p/pub-compostaje01.html>. FUNDASES. Noviembre 3, 2007.

Green Culture Inc. (2006) "Compost Tumblers"
http://www.composters.com/docs/tumblers_1.html Green Culture Inc. Octubre 14, 2006.

InfoAgro (2006) "El Compostaje"
<http://www.infoagro.com/abonos/compostaje2.asp>. InfoAgro. Abril 22, 2006.

Recycle and composting equipment (2008) "Compost Turning"
http://composting.com.au/compost_turning/composting_techniques.html. Recycle and composting equipment. Noviembre 7, 2008.

Ros Roca Internacional (2006) "Compostaje en Tambores"
<http://www.rosroca.de/es/drumcomposting.htm>. Ros Roca Internacional. Mayo 6, 2006

Ros Roca S.A. (2006) "Compostaje en Tambores"
http://www.rosroca.com/es/taxonomy_menu/4/68/97. Ros Roca S.A. Mayo 6, 2006

Ros Roca S.A. (2006) "Compostaje en Túnel"
http://www.rosroca.com/es/taxonomy_menu/4/68/98. Ros Roca S.A. Mayo 6, 2006

SKF (2008) "Catalogo de Chumaceras SKF"
http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=en&newlink=6_1_1. SKF. Julio 12, 2008.

Transform compost systems (2008). "RotoKingTurner".
<http://www.transformcompost.com/RK%20turner.htm>. Transform compost systems.
Noviembre 7, 2008.

WEHRHAHN, Cristián (2006) "Compostaje como Solución de Manejo de Residuos Sólidos" <http://cipres.cec.uchile.cl/~cwehrhah/index.htm>. Universidad de Chile. Abril 22, 2006.

Anexo 1. Resumen de los análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos llevados a cabo para realizar la caracterización de las etapas del procesos de compostaje de la Central Ganadera de Medellín.

Parametro	Unidades	Mesofilica	Termofilica- De Enfriamiento	De maduración	De maduración (Tambor)
ANALISIS ORGANOLEPTICO					
Estado	-	Sólido Húmedo	Sólido Húmedo	Sólido Húmedo	Sólido Húmedo
Color	-	Café	Café	Café	Café
Textura	-	Gruesa Heterogénea	Gruesa Heterogénea	Gruesa Heterogénea	Gruesa Heterogénea
ANALISIS FISICOQUIMICO					
Nitrogeno	%	1,02	2,20	1,83	1,34
Fosforo	%	1,34	0,701	0,563	0,978
Potasio	%	0,662	1,563	0,915	0,286
Calcio	%	2,019	4,460	5,218	4,284
Magnesio	%	0,15	0,768	0,635	1,843
Zinc	%	0,128	No Detectado	No Detectado	No Detectado
CO	%	39,52	35,940	32,72	37,260
Cenizas	%	14,01	19,710	33,45	20,33
Relacion C/N	-	38,75	16,340	17,88	27,81
CRA	%	770,53	284,290	243,98	405,7
CIC	meq/100 g	28,23	42,570	35,27	28,46
CIC/CO	meq/ 100g CO	71,43	118,450	107,79	76,38
Humedad	%	80,86	78,650	19,753	42,42
pH	-	8,88	7,400	7,04	7,38
Conductividad	uS/cm	771,5	1274,500	1,99	1707,5
Densidad	g/cm ³	0,05	0,160	0,27	0,1
Cromo	ppm	4,862	No Detectado	-	<0,042
Cadmio	ppm	No Detectado	16,020	-	0,769
Plomo	ppm	14,934	No Detectado	-	7,934
Niquel	ppm	7,083	No Detectado	-	22,75
ANALISIS MICROBIOLÓGICOS					
Mesofilos	ufc/g	5X10 ⁹	6.0X10 ⁹	1.1X10 ¹⁰	3X10 ⁹
Termofilos	ufc/g	2.3X10 ⁷	2.0X10 ⁷	2.0X10 ⁷	1X10 ⁵
Mohos	ufc/g	1.1X10 ¹	1.1X10 ⁴	1.1X10 ³	2,4X10 ⁵
Levaduras	ufc/g	0	0	0	0
Nematodos y/o Protozoos	-	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes
Enterobacterias	bacterias/g	5X10 ²	0	8X10 ²	2,5X10 ⁵
Salmonella	salmonella/25g	Ausente	Ausente	Ausente	Presente

ANALISIS DE TAMAÑO DE PARTICULA					
Menores a 2mm	% masa seca	9.7	20.4	87.5	64,2
Mayores a 2mm		90.1	79.6	11.3	35,8
ANALISIS FITOTOXICO					
Concentracion	(%P/V Mta Sólida) (%P/V Mta Sólida)	Porcentaje de Germinación (%)			
0		100	100	100	100
2,5		95	100	100	-
5		90	100	100	-
7,5		100	95	100	-
10		100	100	95	100

Anexo 2. Tabla comercial de barras de acero



PESO DE BARRAS DE ACERO (Kilogramos/metro Lineal)

DIMENSIONES					DIMENSIONES				
MM	PULG.	RED.	CUADR.	EXAG.	MM	PULG.	RED.	CUADR.	EXAG.
0,794	1/32	0,004	0,005	0,004	57,150	2+1/4	20,118	25,637	22,209
1,588	1/16	0,016	0,020	0,017	60,325	2+3/8	22,416	28,564	24,745
3,175	1/8	0,062	0,079	0,069	63,500	2+1/2	24,838	31,650	27,419
4,763	3/16	0,140	0,178	0,154	66,675	2+5/8	27,383	34,894	30,229
6,350	1/4	0,248	0,317	0,274	69,850	2+3/4	30,053	38,297	33,177
7,938	5/16	0,396	0,504	0,437	73,025	2+7/8	32,848	41,857	36,261
9,525	3/8	0,559	0,712	0,617	76,200	3	35,766	45,576	39,483
11,113	7/16	0,761	0,969	0,840	79,375	3+1/8	38,809	49,453	42,842
12,700	1/2	0,994	1,266	1,097	82,55	3+1/4	41,975	51,46	46,290
14,288	9/16	1,257	1,602	1,388	85,720	3+3/8	45,27	57,64	49,02
15,875	5/8	1,552	1,978	1,714	88,900	3+1/2	48,682	62,034	53,741
17,463	11/16	1,878	2,394	2,074	92,070	3+5/8	52,22	66,50	57,58
19,050	3/4	2,235	2,849	2,468	95,250	3+3/4	55,884	71,213	61,692
20,638	13/16	2,623	3,343	2,896	98,425	3+7/8	59,672	76,039	65,874
22,225	7/8	3,043	3,877	3,359	101,600	4	63,584	81,024	70,192
23,813	15/16	3,493	4,451	3,856	107,950	4+1/4	71,780	91,469	79,240
25,400	1	3,974	5,064	4,387	114,300	4+1/2	80,474	102,546	88,837
26,988	1+1/16	4,488	5,717	4,935	120,650	4+3/4	89,663	114,257	98,982
28,575	1+1/8	5,030	6,409	5,552	127,000	5	99,350	126,600	109,675
30,163	1+3/16	5,604	7,141	6,186	139,700	5+1/2	120,214	153,186	132,707
31,750	1+1/4	6,209	7,913	6,855	152,400	6	143,064	182,304	157,932
33,338	1+5/16	6,846	8,724	7,557	165,100	6+1/2	167,902	213,954	185,351
34,925	1+3/8	7,513	9,574	8,294	177,800	7	194,726	248,136	214,963
36,513	1+7/16	8,212	10,464	9,065	203,200	8	254,336	324,096	280,768
38,100	1+1/2	8,942	11,394	9,871	228,600	9	321,894	410,184	355,347
39,688	1+9/16	9,702	12,363	10,710	254,000	10	397,400	506,400	438,700
41,275	1+5/8	10,494	13,372	11,584	279,400	11	480,854	612,744	530,827
42,863	1+11/16	11,317	14,421	12,493	304,800	12	572,256	729,216	631,728
44,450	1+3/4	12,170	15,509	13,435	330,200	13	671,606	855,816	741,403
46,038	1+13/16	13,055	16,636	14,412	355,600	14	778,904	992,544	859,852
47,625	1+7/8	13,971	17,803	15,423	381,000	15	894,15	1.139,40	978,075
49,213	1+15/16	14,918	19,010	16,468	406,400	16	1.017,34	1.296,38	1.123,07
50,800	2	15,896	20,256	17,548	431,800	17	1.148,48	1.463,49	1.267,84
53,975	2+1/8	17,945	22,867	19,810	457,200	18	1.287,57	1.640,73	1.421,38

Anexo 3. Hoja técnica tambor perforado de mezcla.

DATOS DE OPERACIÓN		
Capacidad de Carga (Kg)	50	
Velocidad de Operación (RPM)	5	
Voltaje (voltios)	220V, Conexión Trifásica	
Material Procesado	Compost de Rumen	
DATOS DE CONSTRUCCIÓN		
Forma de Tambor	Cilíndrico	
Diámetro del Tambor (m)	0,6	
Longitud del Tambor (m)	1	
Volumen del Tambor (m ³)	0,283	
Orientación	Horizontal	
Material de Construcción del Tambor	Lámina Hot Rolled Perforada ¼" Calibre 16	
Material de Construcción Estructura	Tubería Rectangular en Acero al Carbono 1020 de 6X4 cm. Calibre 18	
	ELABORÓ	Karla Andrea Ossa Vásquez
	APROBÓ	Marta Ruth López
	FECHA	10 Julio 2008



Anexo 4. Registros de porcentaje de humedad de las camas de compostaje.

Muestra	Fecha de Construcción de la cama / # cama	Semanas de Compostaje	Peso Beaker (g)	Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)	% de Humedad
1	8 Junio/ 23	7	132,12	165,23	55,82	66,22
2	17 Julio/ 25	2	204,56	253,44	101,82	59,82
3	15 Junio/ 49	6	178,3	289,61	68,71	76,27
4	22 Julio/ 44	1	172,65	223,03	84,83	61,96
5	27 Mayo/ 17	9	167,65	276,18	115,89	58,04
6	5 Mayo/ 40	12	171,04	254,02	80,11	68,46
7	27 Julio/15	0	175,35	251,73	88,83	64,71
8	10 Julio/ 5	3	166,21	298,45	113,67	61,91
9	28 Junio/ 20	4	146,09	192,53	71,8	62,71
10	22 Junio/ 51	5	149,52	133,36	58,46	56,16

Anexo 5. Registros de densidad de las camas de compostaje.

Muestra	Fecha de Construcción de la cama / # cama	Semanas de Compostaje	Peso Probeta (g)	Volumen Probeta (cm ³)	Peso muestra + probeta 1 (g)	Peso muestra + probeta 2 (g)	Peso muestra + probeta 3 (g)	Densidad Real 1 (g/cm ³)	Densidad Real 2 (g/cm ³)	Densidad Real 3 (g/cm ³)	Densidad Promedio (g/cm ³)
1	8 Junio/ 23	7	70,98	50	77,06	80,07	78,83	0,1216	0,1818	0,1570	0,1535
2	17 Julio/ 25	2	70,98	50	76,61	75,49	76,97	0,1126	0,0902	0,1198	0,1075
3	15 Junio/ 49	6	70,98	50	75,68	76,77	77,02	0,0940	0,1158	0,1208	0,1102
4	22 Julio/ 44	1	70,98	50	77,92	77,21	78,62	0,1388	0,1246	0,1528	0,1387
5	27 Mayo/ 17	9	70,98	50	76,98	76,51	77,84	0,1200	0,1106	0,1372	0,1226
6	5 Mayo/ 40	12	70,98	50	78,67	78,12	76,24	0,1538	0,1428	0,1052	0,1339
7	27 Julio/15	0	70,98	50	75,26	78,79	77,7	0,0856	0,1562	0,1344	0,1254
8	10 Julio/ 5	3	70,98	50	78,16	75,91	75,59	0,1436	0,0986	0,0922	0,1115
9	28 Junio/ 20	4	70,98	50	76,44	78,23	76,63	0,1092	0,1450	0,1130	0,1224
10	22 Junio/ 51	5	70,98	50	76,28	74,8	74,95	0,1060	0,0764	0,0794	0,0873

Anexo 6. Registros de temperatura de las camas de compostaje de prueba.

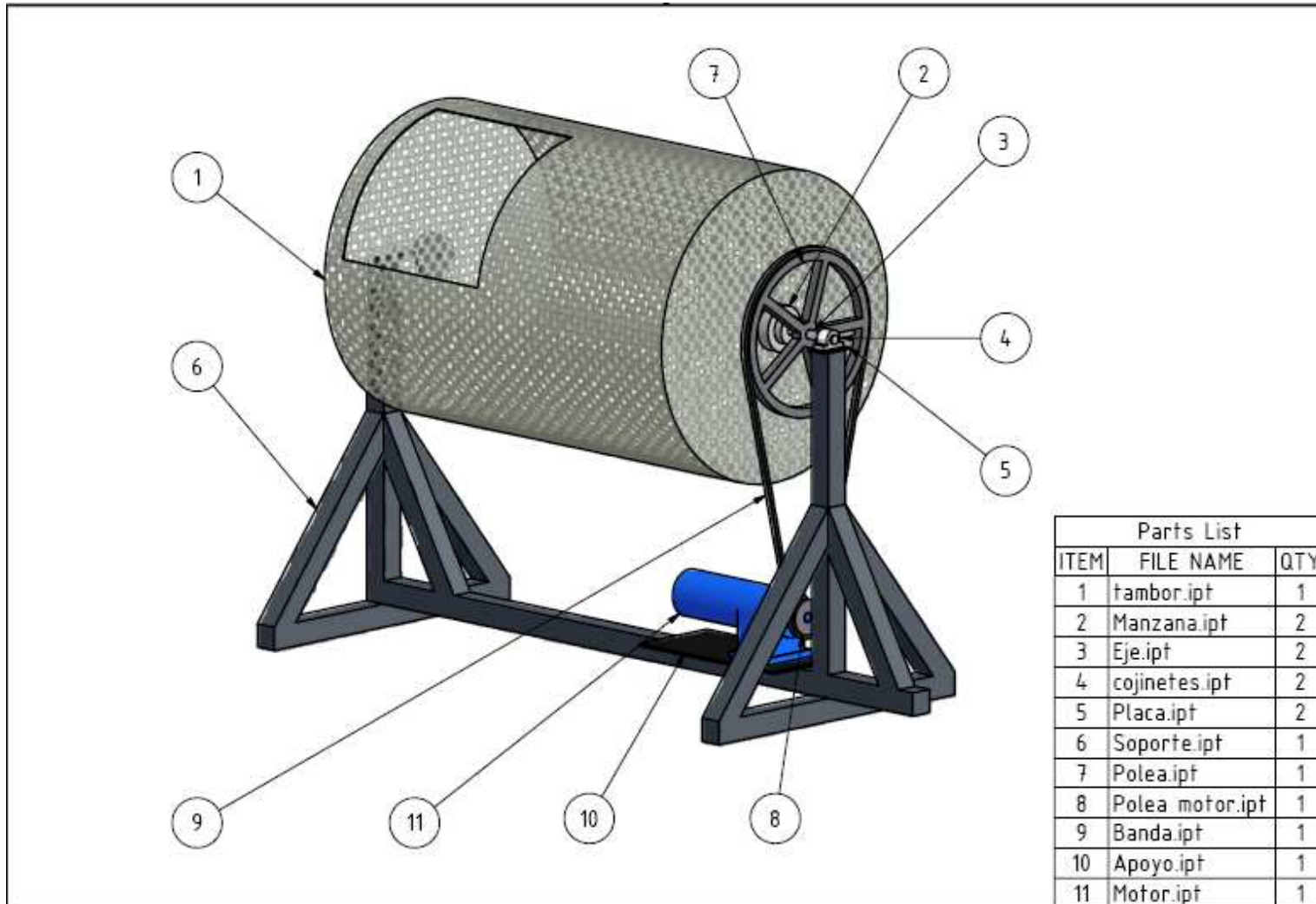
Fecha	Días de Compostaje	Temperatura (°C) Cama 34	Temperatura (°C) Cama 47
Junio 23	0	23	24
Junio 27	4	49	47
Junio 28	5	49	47
Junio 29	6	50	48
Julio 4	11	50	45
Julio 5	12	50	44
Julio 7	14	50	44
Julio 10	17	49	45
Julio 11	18	50	47
Julio 12	19	51	47
Julio 18	25	50	48
Julio 19	26	53	51
Julio 24	31	50	50
Julio 28	35	46	44
Julio 31	38	43	41
Agosto 4	42	36	37
Agosto 8	46	35	36
Agosto 10	48	31	38
Agosto 15	53	33	35
Agosto 16	54	33	35
Agosto 20	58	35	38

Fecha	Días de Compostaje	Temperatura (°C) Cama 34	Temperatura (°C) Cama 47
Agosto 24	62	35	40
Agosto 28	66	30	35
Agosto 30	68	28	30
Septiembre 4	73	25	25
Septiembre 8	77	24	25
Septiembre 11	80	20	20
Septiembre 12	81	19	19

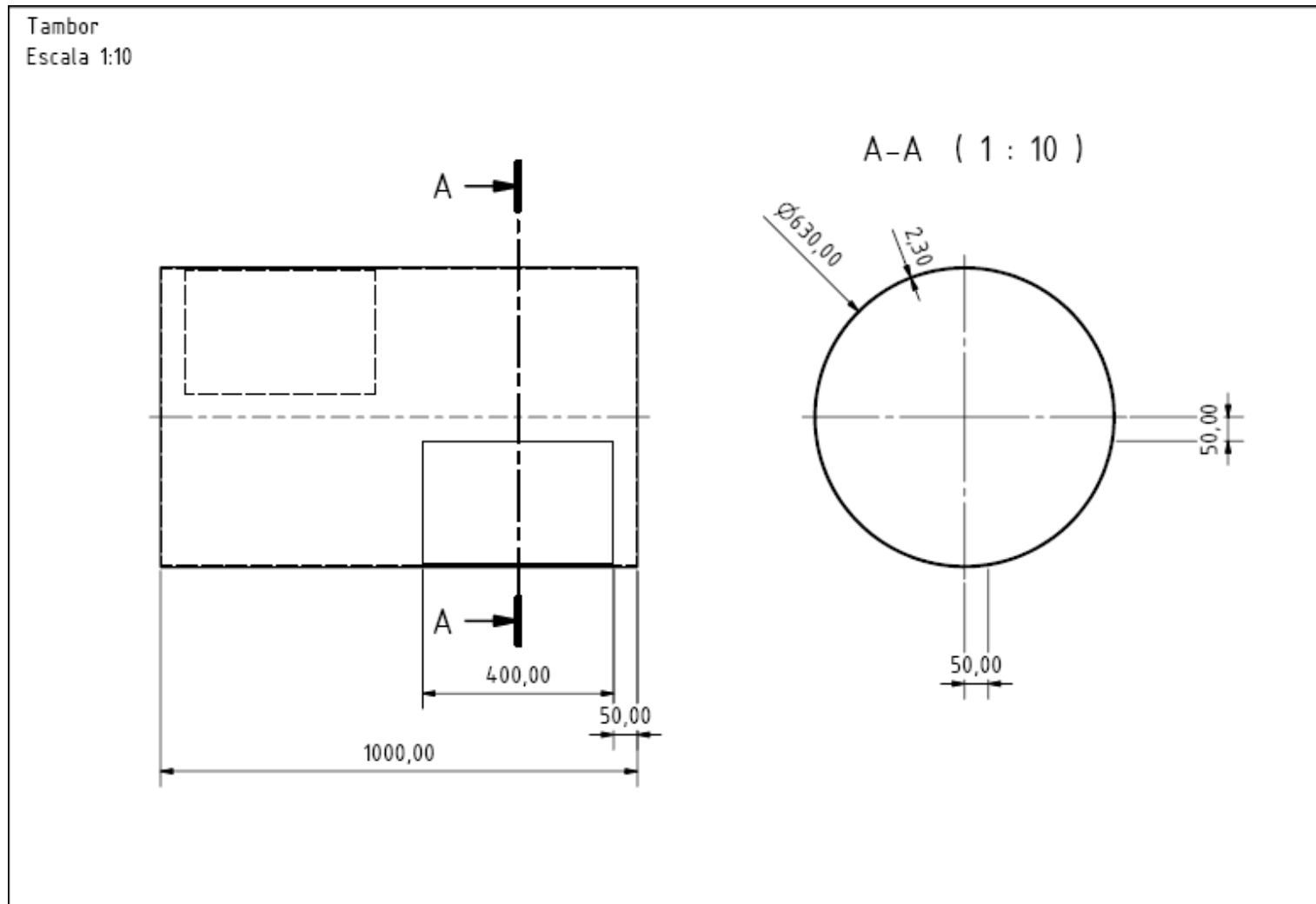
Anexo 7. Registros de temperatura de las camas de compostaje aleatorias de prueba.

Fecha	Camas (aleatorias)	Días de compostaje	Temperatura (°C)
Septiembre 18	48	1	30
Septiembre 11	50	8	52
Septiembre 7	27	12	47
Agosto 31	51	19	42
Agosto 16	18	34	50
Agosto 5	3	45	40
Julio 24	28	57	45
Julio 10	6	71	35
Julio 1	19	80	37

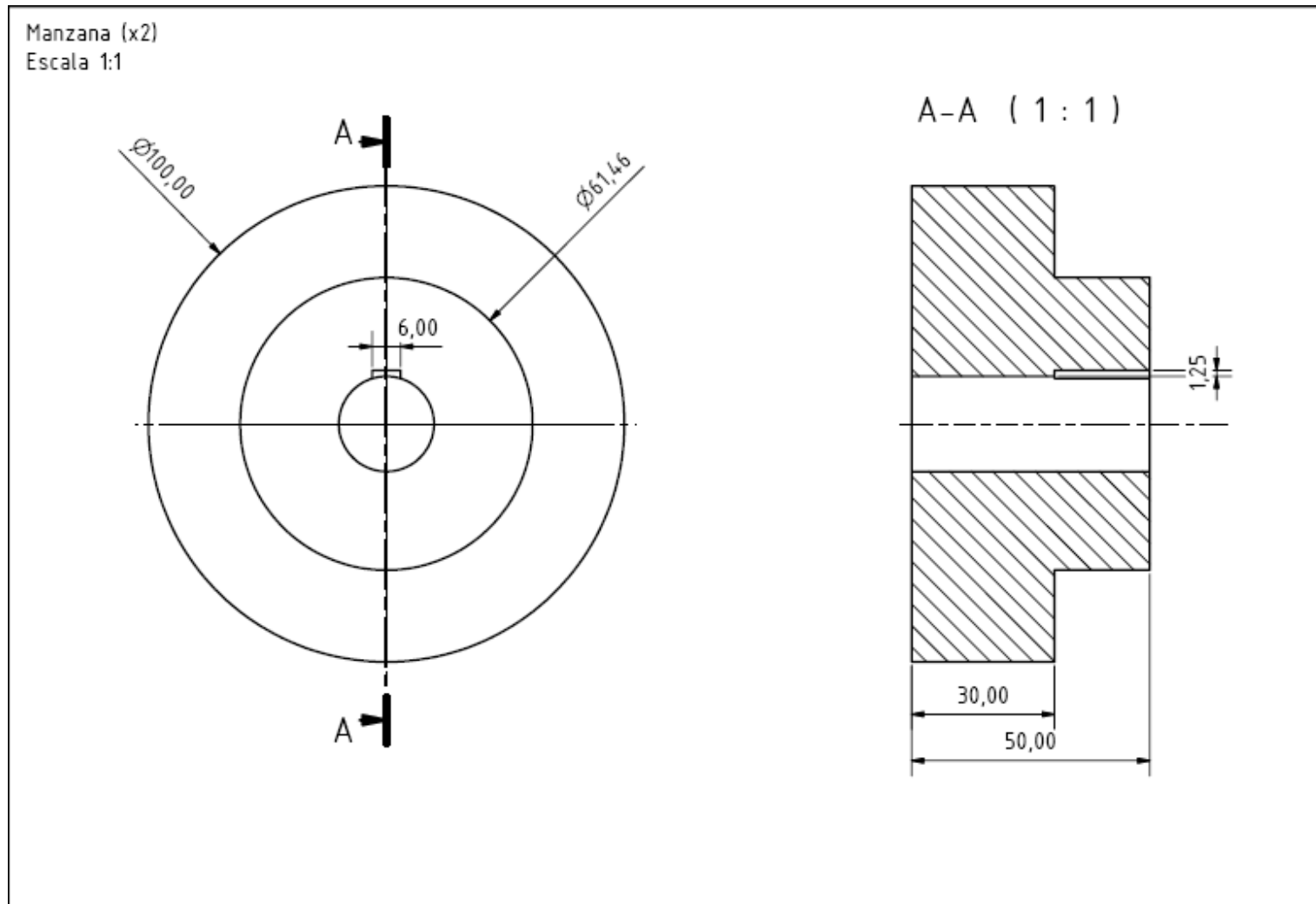
Anexo 8. Plano de ensamble inicial del tambor perforado de mezcla.



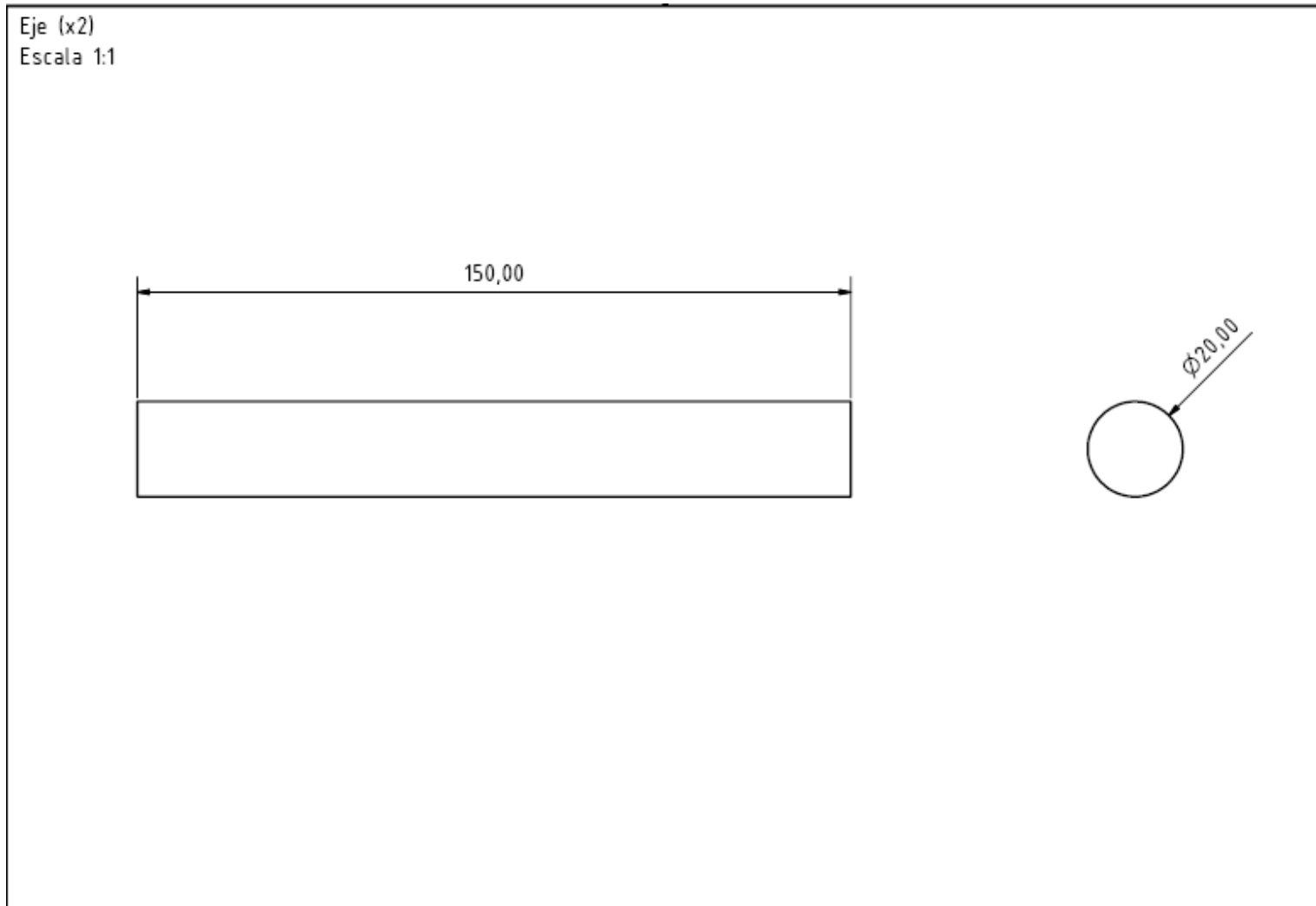
Anexo 9. Plano del diseño inicial del tambor.



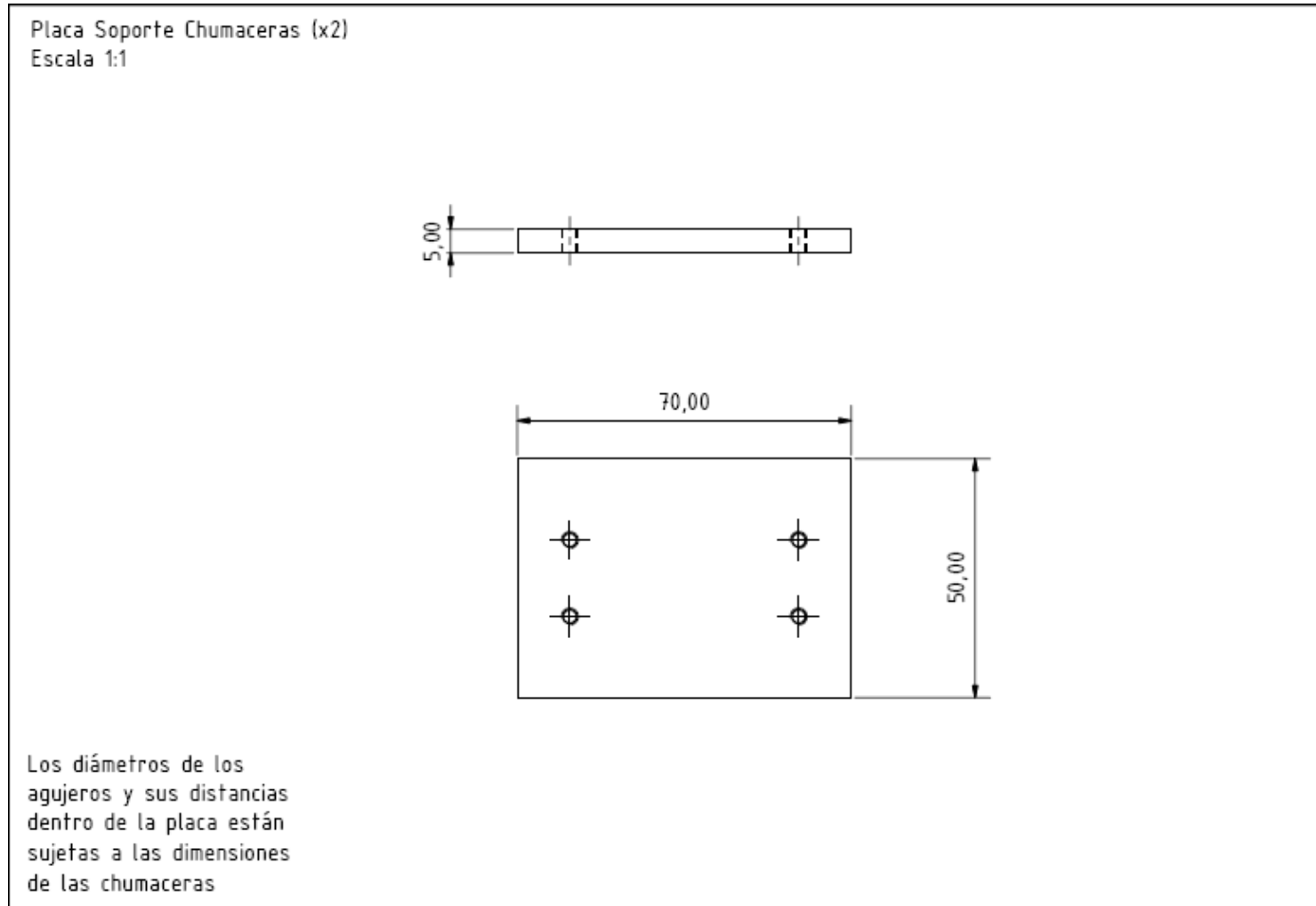
Anexo 10. Plano del diseño inicial de la manzana.



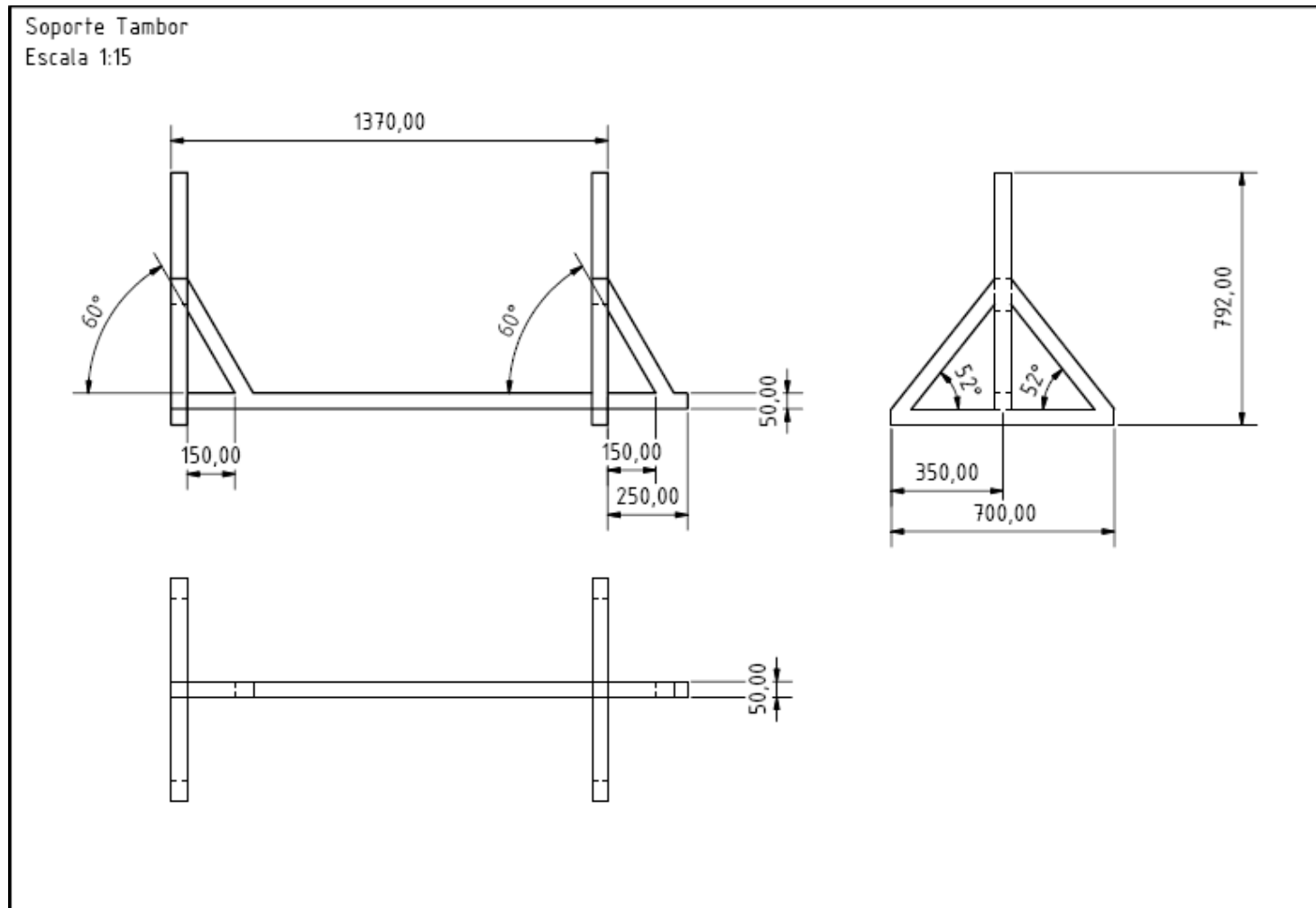
Anexo 11. Plano del diseño inicial del eje.



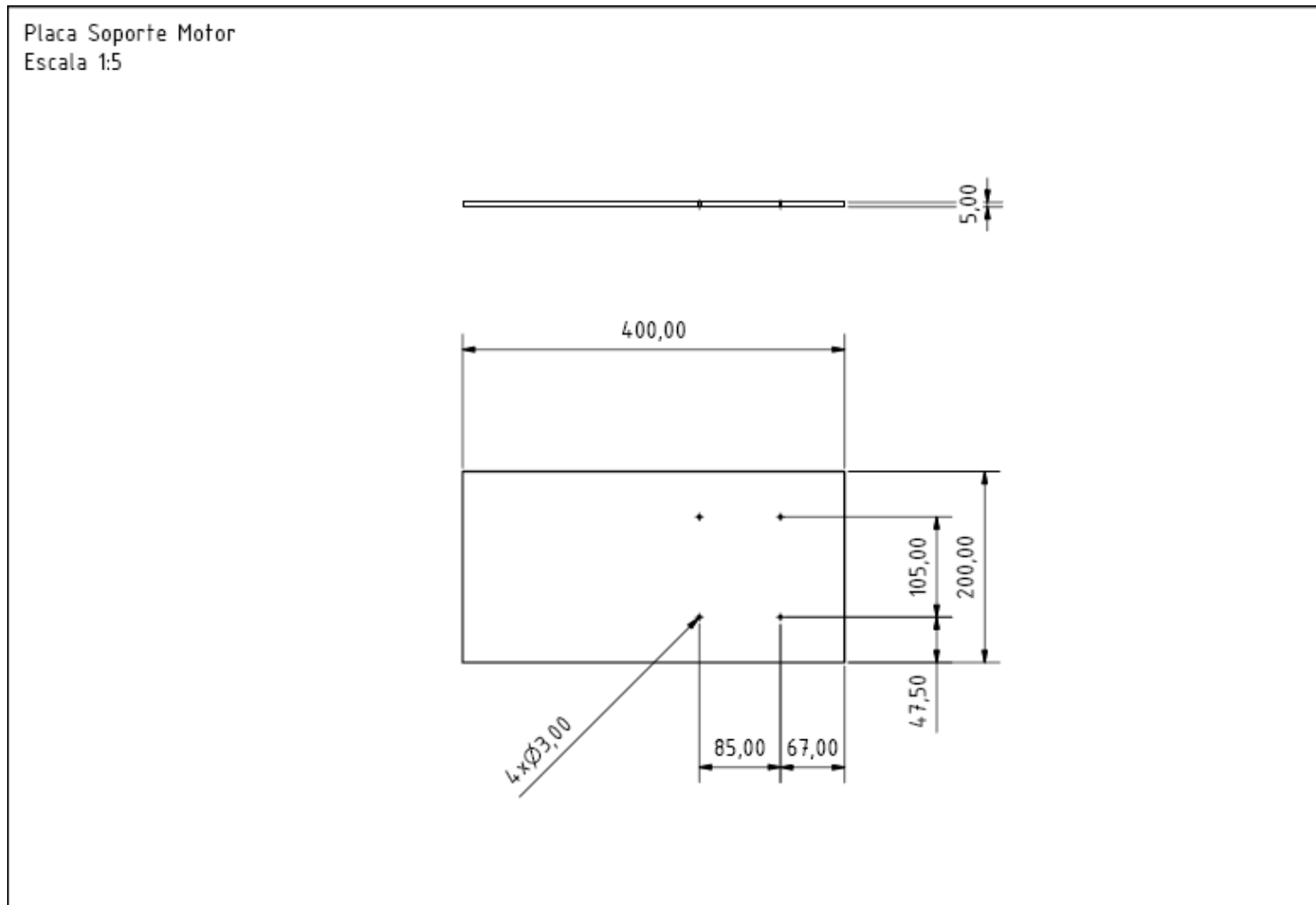
Anexo 12. Plano del diseño inicial de la placa soporte para las chumaceras.



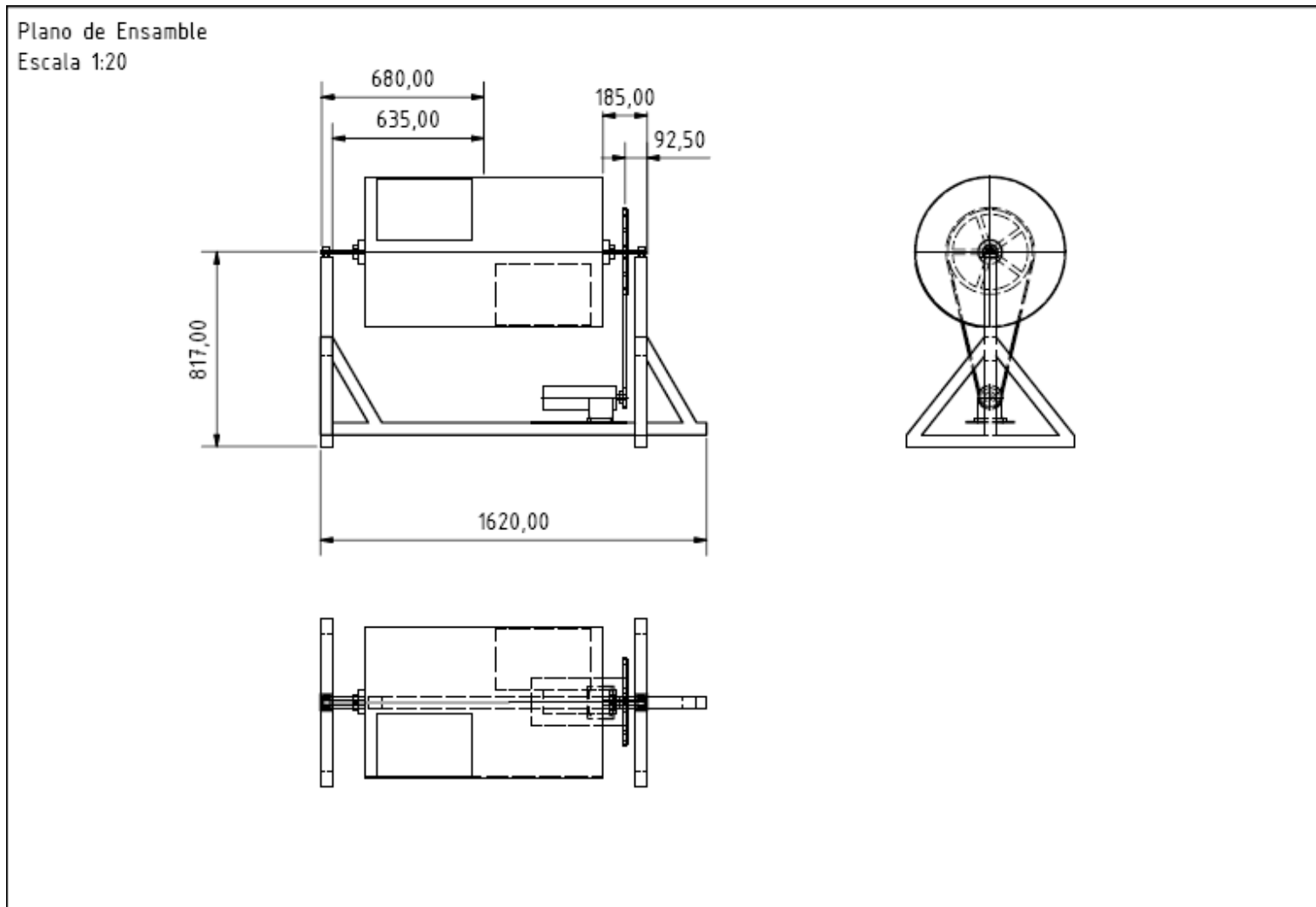
Anexo 13. Plano del diseño inicial del soporte del tambor.



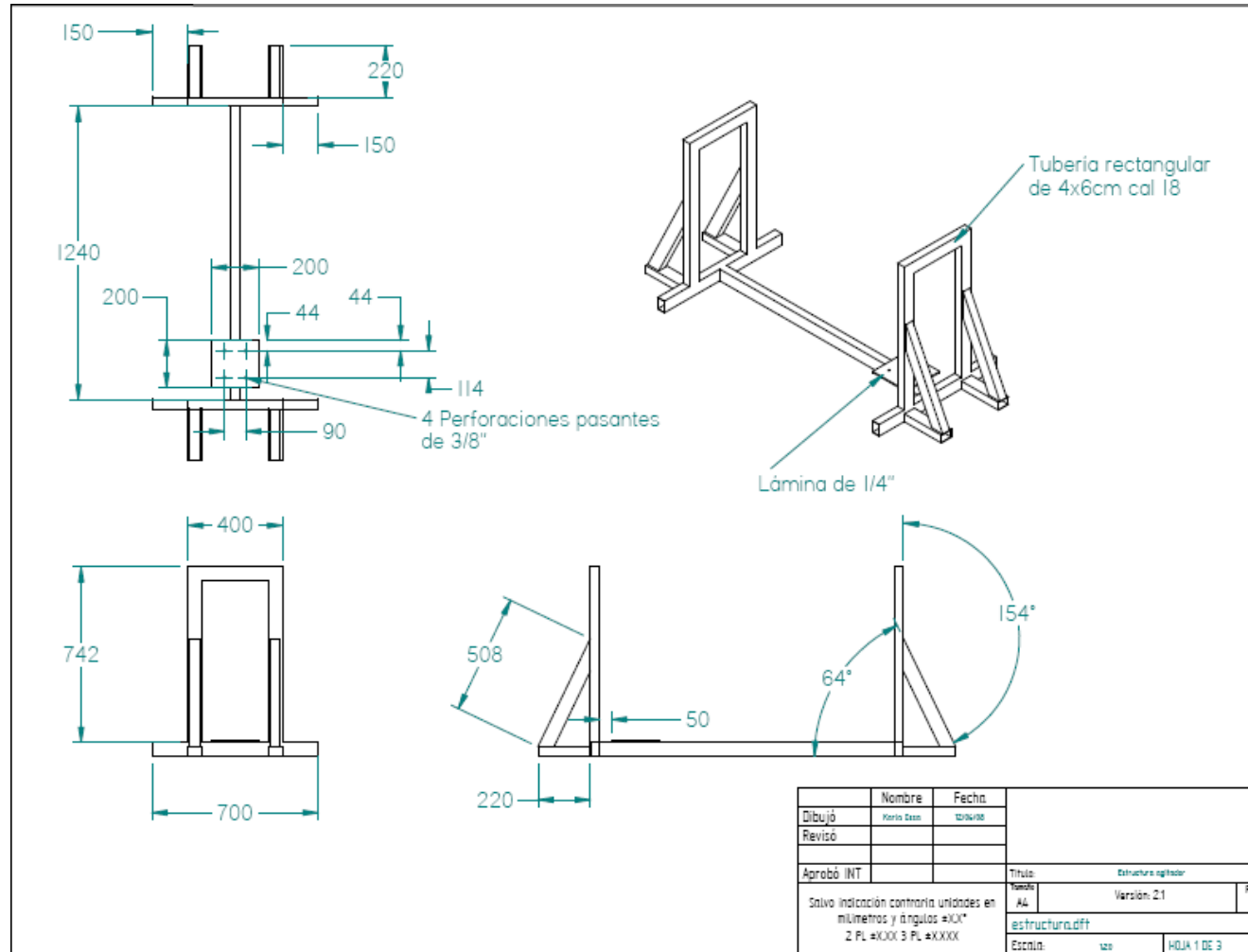
Anexo 14. Plano del diseño inicial de la placa soporte del motor.



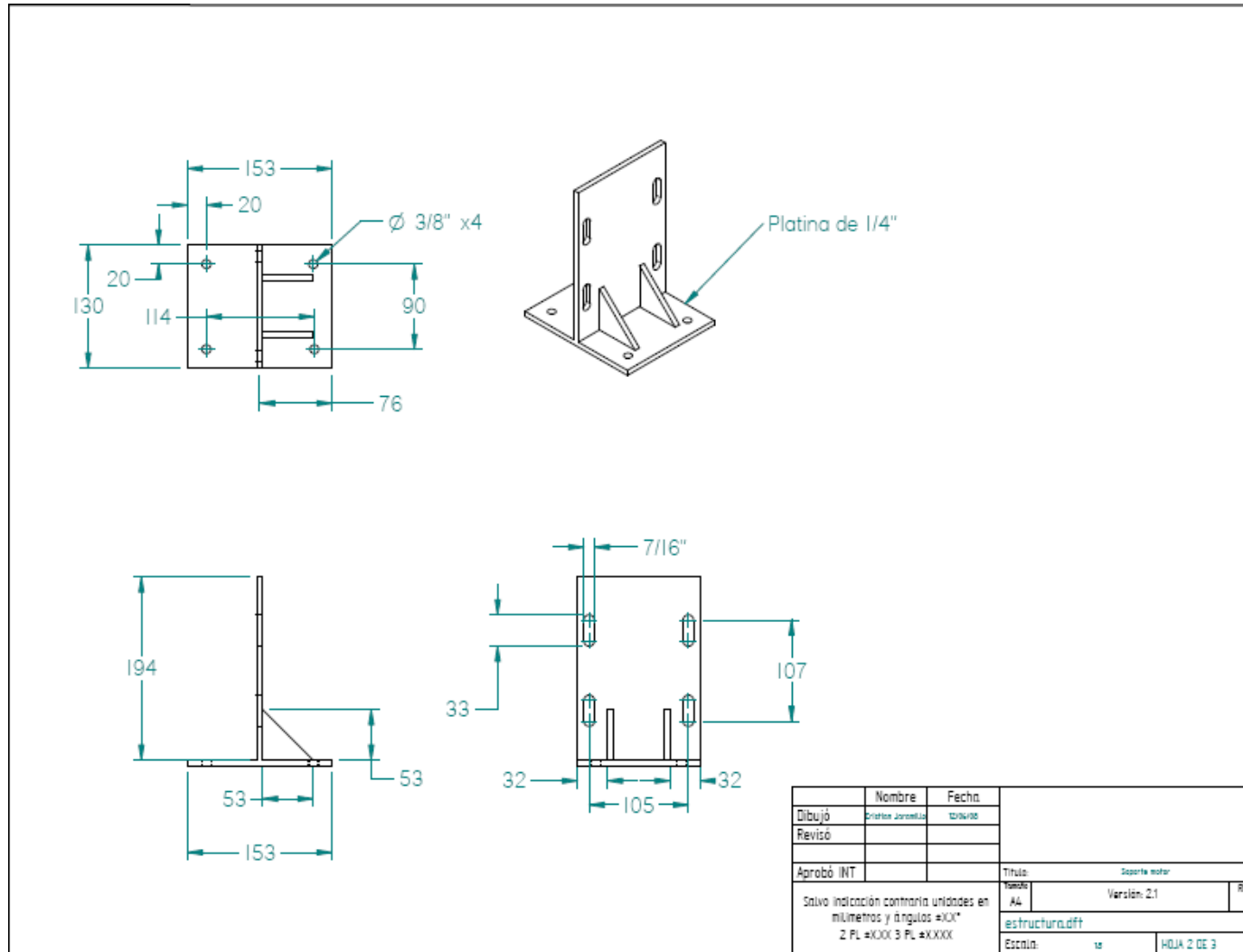
Anexo 15. Plano de ensamble del diseño inicial del tambor.



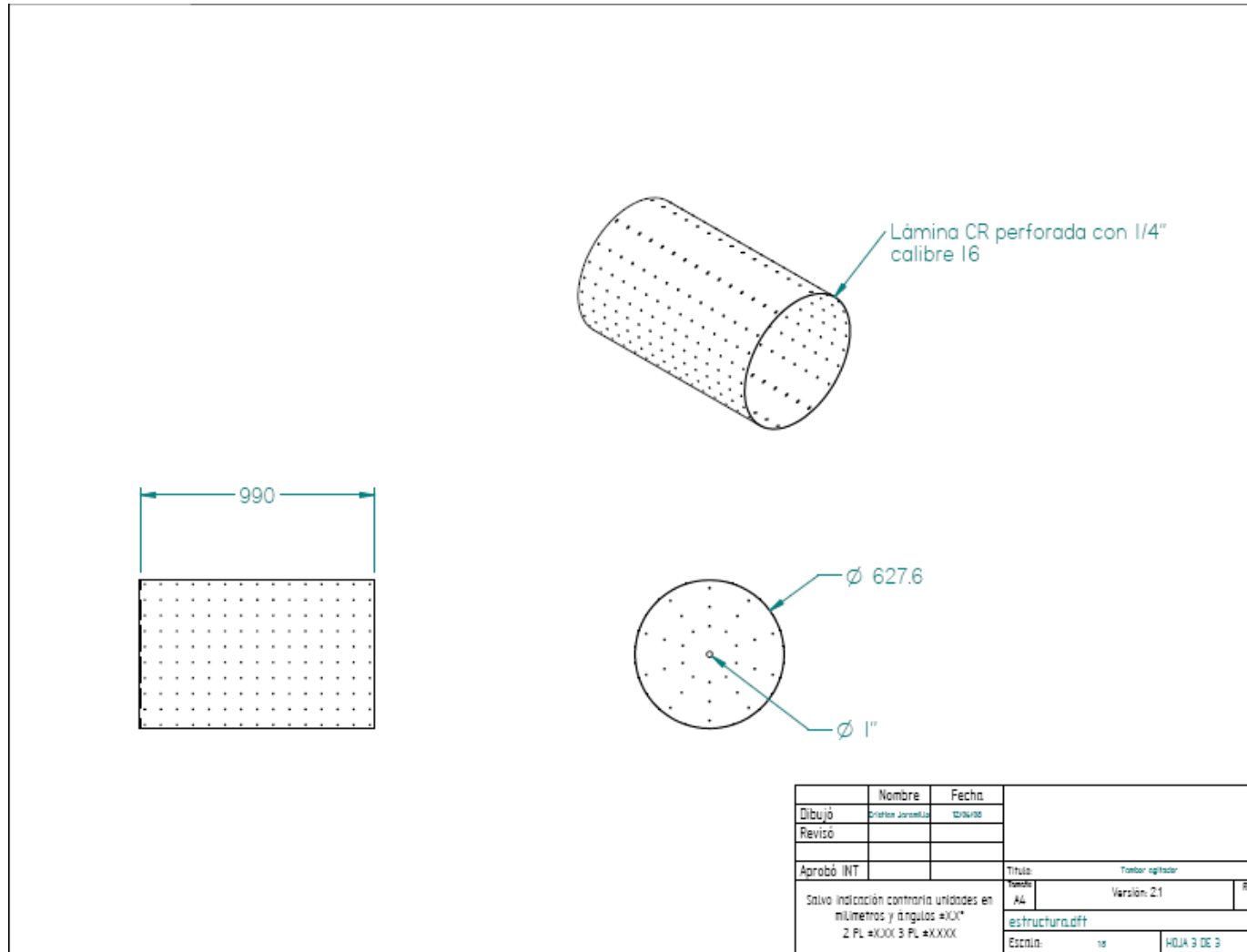
Anexo 16. Plano del diseño final del soporte del tambor.



Anexo 17. Plano del diseño final de la placa de soporte del motor.



Anexo 18. Plano del diseño final del tambor.



Anexo 19. Registro de pruebas de temperatura para el tambor y la cama de prueba #34.

HUMEDAD: 100%		TAMBOR PERFORADO		CAMA #34	
PESO INICIAL: 47 Kg		TIEMPO DE VOLTEO: 12 SEG		DIMENSIONES: 70X70X22	
MEDICIÓN	FECHA	TEMPERATURA (°C)	ACTIVIDAD	TEMPERATURA (°C)	ACTIVIDAD
1	10/07/2008	23	Armado	23	Armado
2	11/07/2008	23		24,5	
3	14/07/2008	15	Antes Volteo	23	Antes Volteo
		10	Después Volteo	15	Después Volteo
4	15/07/2008	11		20	
5	17/07/2008	12	Antes Volteo	19	Antes Volteo
		10	Después Volteo	13	Después Volteo
6	18/07/2008	10		20	
7	21/07/2008	10		21	
8	24/07/2008	11		18	
9	28/07/2008	15	Antes Volteo	17	Antes Volteo
		10	Después Volteo	14	Después Volteo
10	01/08/2008	14	Antes Volteo	16	Antes Volteo
		10	Después Volteo	14	Después Volteo
11	04/08/2008	14		16	
12	06/08/2008	14		16	
13	08/08/2008	13	Antes Volteo	16	Antes Volteo
		10	Después Volteo	13	Después Volteo
14	11/08/2008	12		15	
15	14/08/2008	12	Antes Volteo	14	Antes Volteo
		10	Después Volteo	12	Después Volteo
16	16/08/2008	-	-	12	
17	20/08/2008	-	-	12	Antes Volteo
	20/08/2008	-	-	10	Después Volteo
18	23/08/2008	-	-	11	
19	25/08/2008	-	-	11	
20	27/08/2008	-	-	11	
21	29/08/2008	-	-	11	

