

**Evaluación económica y cualitativa de
diferentes metodologías de aireación en el
compostaje de residuos vitivinícolas en finca
“Juan Muñoz”, Mendoza, Argentina**

TESIS DE GRADO
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Tesista: Esteban Aubert
Director: Dr. Peter Thomas

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

Mendoza, Argentina

2025

Evaluación económica y cualitativa de diferentes metodologías de aireación en el compostaje de residuos vitivinícolas en finca “Juan Muñoz”, Mendoza, Argentina

Tesista: Esteban Aubert

Director: Dr. Peter Thomas

pthomas@fca.uncu.edu.ar

Comisión Evaluadora:

Ing. Dra. Alejandrina Alaria

Ing. Agr. MSc. Silvina Greco

Lic. MSc. Martín Viani

RESUMEN

Los residuos orgánicos generados por la industria vitivinícola pueden ser tratados y valorizados de manera eficiente mediante el proceso de compostaje. En esta tesis se presenta un estudio comparativo de tres metodologías de aireación aplicadas al compostaje de residuos orgánicos producidos en la finca “Juan Muñoz”, con el objetivo de identificar la alternativa más eficiente en términos de costos operativos y calidad final del compost obtenido, conforme a los criterios establecidos en la Resolución Conjunta 1/2019 emitida por la SCyMA y el SENASA.

A partir de un sustrato compuesto por orujo agotado de uva, escobajo, estiércol vacuno y estiércol equino, se conformaron tres pilas de similares dimensiones, cada una con un sistema de aireación diferente. Las metodologías evaluadas fueron: (i) Aireación Pasiva sin Volteo, en la cual la pila de sustrato fue dispuesta sobre pallets con un colchón de escobajo, incorporando tubos de PVC ubicados verticalmente a lo largo del eje central para favorecer el ingreso de oxígeno, sin realizar movimientos durante el proceso; (ii) Aireación Natural sin Volteo, donde la pila de sustrato se colocó sobre un colchón de escobajo dispuesto sobre suelo desnudo, también sin movimientos durante el proceso; y (iii) Aireación por Volteo Mecánico, en la que la pila de sustrato se dispuso directamente sobre el suelo desnudo y se utilizó una retroexcavadora para realizar volteos semanales que promovieron la oxigenación del material.

Durante el proceso se monitorearon variables físico-químicas indicadoras del grado de descomposición del sustrato, tales como temperatura, humedad, pH, contenido de materia orgánica, relación C:N, cenizas, carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, potasio y conductividad eléctrica. Paralelamente, se realizó un análisis económico que consideró los costos asociados a insumos, mano de obra, consumo energético y equipamiento requerido para cada metodología.

Los resultados demostraron que, partiendo de un sustrato adecuado, es posible obtener compost de buena calidad mediante cualquiera de las tres metodologías de aireación evaluadas. Sin embargo, el tiempo de degradación de la materia orgánica se identificó como el principal factor diferenciador entre ellas. En términos cualitativos, la metodología de aireación por volteo mecánico presentó un proceso de descomposición más rápido y una mayor uniformidad en el compost final. No obstante, este método también implicó el mayor costo operativo, debido al uso de maquinaria y al consumo de combustible.

La implementación de un sistema de aireación pasiva sin volteo requiere una infraestructura específica —pallets, caños de PVC— que incrementa significativamente los costos iniciales, aunque favorece la oxigenación interna del material. Por su parte, la aireación natural sin volteo se destacó como la alternativa más económica, pero los métodos estáticos en general presentan un proceso de degradación más lento debido a la limitada entrada de oxígeno. La incorporación de tubos de PVC en el sistema de aireación pasiva mejoró la degradación del sustrato en comparación con la aireación natural, aunque sin alcanzar la eficiencia observada en el sistema con volteo mecánico.

En consecuencia, los métodos estáticos resultan adecuados cuando se dispone de mayor tiempo para el proceso de compostaje y se busca minimizar la inversión inicial, mientras que la aireación por volteo mecánico constituye la técnica más conveniente en contextos donde se cuenta con maquinaria necesaria y se requiere obtener un compost maduro en plazos reducidos. Por lo tanto, la selección del método de aireación más adecuado dependerá de las condiciones particulares de cada productor, considerando la disponibilidad de recursos financieros, la infraestructura existente, el horizonte temporal previsto y el uso final del compost.

Palabras clave: compost, aireación, análisis, economía de proceso, calidad

ABSTRACT

Organic waste generated by the wine industry can be efficiently treated and recovered through the composting process. This thesis presents a comparative study of three aeration methodologies applied to the composting of organic waste produced at the "Juan Muñoz" farm, with the aim of identifying the most efficient alternative in terms of operating costs and final quality of the compost obtained, in accordance with the criteria established in Resolution 1/2019 issued by SCyMA and SENASA.

Using a substrate composed of spent grape pomace, straw, cattle manure, and horse manure, three piles of similar dimensions were formed, each with a different aeration system. The methodologies evaluated were: (i) Passive Aeration without Turning, in which the pile was placed on pallets with a mattress of straw, incorporating PVC tubes located vertically along the central axis to promote oxygen intake, without any movement during the process; (ii) Natural Aeration without Turning, where the pile was placed on a straw mattress laid on bare ground, also without movement during the process; and (iii) Mechanical Turning Aeration, in which the pile was placed directly on bare ground and a backhoe was used to perform weekly turning to promote oxygenation of the material.

During the process, physical and chemical variables indicative of the degree of substrate decomposition were monitored, such as temperature, humidity, pH, organic matter content, C:N ratio, ash, organic carbon, nitrogen, phosphorus, potassium, and electrical conductivity. At the same time, an economic analysis was carried out that considered the costs associated with inputs, labor, energy consumption, and equipment required for each methodology.

The results showed that, starting with a suitable substrate, it is possible to obtain good quality compost using any of the three aeration methodologies evaluated. However, the degradation time of organic matter was identified as the main differentiating factor between them. In qualitative terms, the mechanical turning aeration methodology presented a faster decomposition process and greater uniformity in the maturity of the final compost. However, this method also involved the highest operating cost, due to the use of machinery and fuel consumption.

In contrast, the implementation of a passive aeration system without turning requires specific infrastructure—pallets, PVC pipes—which significantly increases initial costs, although it promotes internal oxygenation of the material. Natural aeration without turning stood out as the most economical alternative, but static methods generally result in a slower degradation process due to limited oxygen intake. The incorporation of PVC pipes into the passive aeration system improved substrate degradation compared to natural aeration, although without achieving the efficiency observed in the mechanical turning system.

Consequently, static methods are suitable when more time is available for the composting process and the initial investment is to be minimized, while mechanical turning aeration is the most convenient technique in contexts where the necessary machinery is available and mature compost is required in a short time frame. Therefore, the selection of the most appropriate aeration method will depend on the particular conditions of each producer, considering the availability of financial resources, the existing infrastructure, the expected time frame, and the end use of the compost.

Keywords: compost, aeration, analysis, process economy, quality

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá y a mi papá, por su amor incondicional y su apoyo constante en cada etapa de mi vida y mis estudios.

A India y amigos, por acompañarme con paciencia y alegría y durante todo este proceso.

A Peter Thomas, por haberme escuchado y brindado valiosos consejos al momento de encarar este trabajo.

A todo el personal de la finca Juan Muñoz, por su amabilidad, buena predisposición y por permitirme realizar mi trabajo en sus instalaciones. En particular, quiero agradecer a Joaquín Muñoz, Nicolás Muñoz, Pablo Milán, Rubén y Pablo Branca, por su compañía y por la valiosa colaboración brindada durante el trabajo de campo.

A Analía, del laboratorio de Química Orgánica, y a María Eugenia, del área de Estadística, así como a Nicolás Martín, Laura Alturria y Laura Abraham y a la gente del INTA Pedro Rizzo e Iván Funes Pinter por su constante buena predisposición y por estar siempre dispuestos a responder mis dudas.

A las personas de la bodega Viña Cobos, en especial a Nicolás Araya y Marina Miceli, por mostrarme su proyecto de compostaje y por brindarme su ayuda y orientación al momento de iniciar este trabajo.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento por haber formado parte de este proyecto y por contribuir, de distintas maneras, a que este trabajo fuera posible.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
1. Introducción	10
1.1 Justificación	10
1.2 Antecedentes y Marco Referencial	12
1.2.1 Historia del compostaje	12
1.2.2 Fundamentos técnicos	13
1.2.2.1 Etapas del compostaje.....	14
1.2.2.2 Factores que afectan el proceso de compostaje	16
1.2.2.3 Técnicas de compostaje	21
1.2.2.4 Marco legal	24
1.2.2.5 Calidad del compost.....	25
1.2.2.6 Aspectos técnicos en el desarrollo y control del compostaje.....	27
2. Objetivos.....	29
2.1 Objetivo general	29
2.2 Objetivos específicos.....	29
3. Metodología y materiales.....	29
3.1 Descripción del área de trabajo	31
3.2 Elección de los sistemas de aireación	32
3.3 Tareas preliminares al procedimiento de compostaje.....	35
3.4 Armado de las pilas de compostaje	36
3.5 Controles llevados a cabo durante el procedimiento de compostaje.....	38
3.5.1 Medición de la temperatura.....	38
3.5.2 Medición de la humedad	39
3.5.3 Volteo de las pilas.....	39
3.6 Costos económicos	39
3.6.1 Cálculo de Costos.....	¡Error! Marcador no definido.
3.6.1.1 Gastos comunes a los 3 métodos de aireación	40
3.6.1.2 Gastos atribuidos al método de aireación natural.....	44
3.6.1.3 Gastos atribuidos al método de aireación pasiva	44
3.6.1.4 Gastos atribuidos al método con volteo mecánico	45
3.6.1.5 Alquiler de maquinaria	45
3.7 Análisis de costos.....	¡Error! Marcador no definido.
3.8 Evaluación de calidad del compost.....	46
3.8.1 Medición de la temperatura.....	47
3.8.2 Análisis estadístico	47

3.9 Finalización del procedimiento de compostaje	 Error! Marcador no definido.
3.9.1 Análisis de Laboratorio.....	48
3.9.2 Comparación con parámetros de la Resolución Conjunta 1/19 Error! Marcador no definido.	
4. Resultados.....	49
5. Conclusiones	63
6. Bibliografía.....	65
7. Anexo I	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del proceso de compostaje..	14
Figura 2: Proceso de descomposición de las partículas sólidas de materia orgánica.....	20
Figura 3: Movimiento del flujo de aire dentro de una pila de compostaje con aireación natural; plano trasversal.....	21
Figura 4: Representación cartográfica de los límites de la finca 'Juan Muñoz', con localización de sitios clave y recorridos vinculados al procedimiento de compostaje	31
Figura 5: Representación cartográfica del playón de compostaje, con localización de pilas, acequia y toma de agua.....	32
Figura 6: Disposición cruzada de las perforaciones a lo largo del tubo de PVC	33
Figura 7: Representación de un plano transversal de la pila de aireación pasiva sin volteo.	34
Figura 8: Representación de un plano transversal de la pila de aireación natural sin volteo.	34
Figura 9: Representación de un plano transversal de la pila de aireación por volteo con el uso de retroexcavadora	35
Figura 10: Pila de sustrato homogeneizado. Dicho sustrato fue utilizado para la posterior formación de las tres pilas de compost.	36
Figura 11: Termómetro utilizado para la medición de temperatura.....	38
Figura 12: Representación gráfica de la metodología de toma de temperatura realizada en las 3 pilas de compost	39
Figura 13: Diagrama de flujo que representa los gastos incurridos en las tres metodologías de aireación	39
Figura 14: Captura de pantalla de la aplicación GPS Tracker.....	40
Figura 15: Especificaciones de la bomba y tablero de control de la misma.....	44
Figura 16: Gráfico de puntos que muestra la temperatura (°C) de las pilas de compost en función del tiempo transcurrido (semanas)..	55
Figura 17.1: Evolución de la temperatura de las pilas durante el procedimiento de compostaje según las distintas metodologías de aireación a 20 cm de profundidad.....	68
Figura 17.2: Evolución de la temperatura de las pilas durante el procedimiento de compostaje según las distintas metodologías de aireación a 60 cm de profundidad.....	69
Figura 17.3: Evolución de la temperatura de las pilas durante el procedimiento de compostaje según las distintas metodologías de aireación a 90 cm de profundidad.....	69
Figura 17.4: Riego de la pila de sustrato homogeneizado.....	70

Figura 17.5: Disposición de los pallets utilizados para la conformación del sistema de aireación pasiva sin volteo	70
Figura 17.6: Conformación de la cama de escobajo utilizado en el sistema de aireación pasiva sin volteo	71
Figura 17.7: Cama de escobajo utilizado en el sistema de aireación pasiva sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el suroeste.	72
Figura 17.8: Inicio de la formación de la pila de compostaje con el sistema de aireación pasiva sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el noroeste.....	73
Figura 17.9: Pila de compostaje con el sistema de aireación pasiva sin volteo.....	74
Figura 17.10: Cama de escobajo correspondiente al sistema de aireación natural sin volteo	74
Figura 17.11: Pila de compostaje con el sistema de aireación natural sin volteo.	75
Figura 17.12: Pila de compostaje con el sistema volteo mecánico.....	75
Figura 17.13: Primer volteo realizado en la pila de compostaje con el sistema volteo mecánico.	76
Figura 17.14: Disposición de las pilas luego del primer volteo realizado en la pila de compostaje con el sistema volteo mecánico.	76
Figura 17.15: Apertura de la pila de volteo mecánico una vez dado por finalizado el procedimiento de compostaje	77
Figura 17.16: Imagen que detalla el compost obtenido de la pila de volteo mecánico una vez dado por finalizado el procedimiento de compostaje.....	78
Figura 17.17: Apertura de la pila de aireación natural sin volteo una vez dado por finalizado el procedimiento de compostaje.	79
Figura 17.19: Compost obtenido de la sección cercano a la superficie de la pila con aireación estática al finalizar el procedimiento de compostaje.....	81
Figura 17.20: Corte transversal de la pila de compost con aireación pasiva sin volteo, mostrando la fracción degradada por actividad fúngica	82
Figura 17.21: Corte transversal de la pila de compost con aireación natural sin volteo, mostrando la fracción degradada por actividad fúngica	83

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Tabla N° 3 del Anexo IV de la Resolución 1/2019	26
Cuadro 2: Tabla N° 5 del Anexo IV de la Resolución 1/2019	26
Cuadro 3. Diagrama de Gantt con las etapas del procedimiento de compostaje.....	39
Cuadro 4: Gastos comunes a los 3 métodos de aireación ¡Error! Marcador no definido.	
Cuadro 5: Gastos atribuidos al método de aireación natural... ¡Error! Marcador no definido.	
Cuadro 6: Gastos atribuidos al método de aireación pasiva.....	51
Cuadro 7: Gastos atribuidos al método de volteo mecánico.... ¡Error! Marcador no definido.	
Cuadro 8: Gastos comunes a los 3 métodos de aireación considerando el alquiler de la retroexcavadora..... ¡Error! Marcador no definido.	

Cuadro 9: Gastos atribuidos al método de aireación natural considerando el alquiler de la retroexcavadora.....	¡Error! Marcador no definido.
Cuadro 10: Gastos atribuidos al método de aireación natural considerando el alquiler de la retroexcavadora.....	¡Error! Marcador no definido.
Cuadro 11: Gastos atribuidos al método de volteo mecánico considerando el alquiler de la retroexcavadora.....	¡Error! Marcador no definido.
Cuadro 12: Resumen de gastos de los diferentes métodos de aireación evaluados, con y sin alquiler de retroexcavadora, expresados en AR\$ y US\$	¡Error! Marcador no definido.
Cuadro 13: Resumen de los parámetros medidos mediante análisis de laboratorio	¡Error! Marcador no definido.
Cuadro 14: Comparación de los valores de N, P y K obtenidos con los parámetros establecidos por Agricultural Compost Factsheets.....	60
Cuadro 15. Comparación de los valores de parámetros obtenidos en laboratorio con los especificados por la Resolución 1/19. Fuente: Resolución Conjunta 1/19.....	62

1. Introducción

1.1 Justificación

Mendoza es una provincia con una destacada actividad agroindustrial, donde la industria vitivinícola constituye uno de los pilares fundamentales de su economía. En conjunto, la producción agropecuaria y la industria manufacturera (en donde están incluidas las industrias agroindustriales) contribuyen en un 23 % del total del producto bruto geográfico de la Provincia. Este aporte varía según cada departamento, llegando a valores superiores al 50 % en Luján de Cuyo y Junín (Fernández et al., 2019).

La vitivinicultura genera una gran cantidad de residuos, entre ellos orujo de uva agotado (OUA) y escobajo, subproductos derivados del proceso de vinificación (Pisi, 2017). Considerando el total de residuos orgánicos generados por la industria vitivinícola en Mendoza, y con base en datos del año 2015, se estimó una producción anual de 141.365 toneladas de residuos biomásicos provenientes de este sector (FAO, 2017). Entre las opciones actualmente disponibles para el manejo de este tipo de material, el compostaje se presenta como un tratamiento que permite estabilizar y valorizar estos residuos, transformándolos en una valiosa enmienda orgánica.

El compostaje se define como un proceso de descomposición aeróbica de la materia orgánica, llevado a cabo por microorganismos bajo condiciones controladas (Rynk, 1992). Este proceso busca recrear, en un entorno gestionado por el hombre, las condiciones naturales del suelo, donde la materia orgánica acumulada se descompone principalmente por la acción de microorganismos. El metabolismo de estos organismos se ve influenciado por diversos factores abióticos que inciden de manera directa o indirecta en su actividad (Fariás Camero et al., 1999). En consecuencia, el manejo de estos factores hace que ningún procedimiento de compostaje sea idéntico a otro, lo que deriva en compost con características finales similares, aunque nunca exactamente iguales.

En distintas bodegas de Mendoza se emplean diversas metodologías de compostaje, seleccionadas según las particularidades y requerimientos de cada establecimiento. La elección de una técnica u otra está determinada, entre otros factores, por el volumen y tipo de residuo a tratar, el nivel de inversión posible, el espacio disponible, la complejidad operativa del sistema y el uso previsto para el compost obtenido (Rynk 1992, Solano et al., 2001; Oguande y Osunade, 2011).

En un establecimiento con un sistema productivo a gran escala que utilice el compostaje como alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos, los costos asociados a la inversión inicial y a las operaciones durante todo el proceso resultan determinantes para el productor al momento de implementar esta práctica. El aspecto económico es clave, ya que optar por una metodología de bajo costo puede comprometer tanto la eficiencia del procedimiento como la calidad del compost obtenido.

La calidad del compost se define por sus características físicas, químicas, biológicas y sanitarias, las cuales determinan su aptitud para un uso seguro y eficaz como enmienda orgánica o fertilizante en la agricultura. En Argentina, dicha calidad se evalúa mediante análisis de laboratorio que verifican el cumplimiento de los estándares establecidos en la normativa nacional. En este sentido, la Secretaría de Control y Monitoreo Ambiental y el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) aprobaron en 2019 la Resolución Conjunta 1/2019, que establece los parámetros fisicoquímicos y biológicos necesarios para garantizar la eficacia del compost como enmienda orgánica segura para el suelo y sin riesgos para la salud humana.

La Resolución Conjunta 1/2019 establece requisitos para clasificar al compost dentro de dos categorías: Clase A y Clase B. Dicha clasificación es crucial para definir su aplicación, dado que el compost de Clase A puede utilizarse sin restricciones, mientras que el compost de Clase B debe aplicarse en dosis específicas, conforme a las directrices del Anexo IV de la citada resolución.

A nivel mundial, el compostaje de grandes volúmenes de materia orgánica se realiza principalmente mediante pilas al aire libre, debido a que es un sistema económico y de fácil implementación. Su bajo costo, es influenciado en gran medida al sistema de aireación elegido, ya que la aireación es el factor más manipulable para optimizar el procedimiento, influyendo de manera significativa en la calidad del compost como en los costos económicos generados (Cegarra et al., 2006).

Dado que el sistema de aireación es una variable fácilmente manipulable para optimizar el procedimiento de compostaje, y considerando que, según Moreno Casco et al. (2008), representa entre el 32 % y el 46 % de los costos totales, se seleccionó este factor como objeto de estudio para evaluar qué métodos de aireación permiten obtener un compost con una adecuada relación costo-calidad.

Actualmente, algunas bodegas en Mendoza han estudiado las variables técnicas y cualitativas del compostaje a escala industrial. No obstante, la investigación de esta tesis no ha encontrado antecedentes en la literatura científica que aborden de manera conjunta el análisis económico y la calidad del compost en diferentes metodologías de aireación aplicadas al compostaje de residuos vitivinícolas de la región Mendoza.

Considerando el contexto socioeconómico de la provincia de Mendoza, se eligen tres métodos de aireación en función de la baja disponibilidad de recursos requeridos para su implementación, un aspecto clave al momento de definir un procedimiento de compostaje viable para los productores locales y para la realización de la presente tesis.

Los métodos de aireación evaluados incluyen dos sistemas de aireación estática y uno mediante volteo mecánico. El primer método estático, denominado aireación pasiva, emplea pallets y chimeneas para facilitar el ingreso de oxígeno al interior de la pila. El segundo, conocido como aireación natural, permite el ingreso de oxígeno a través de la convección natural del aire. Por último, el método de aireación por volteo mecánico consiste en realizar volteos semanales del sustrato utilizando una retroexcavadora.

Para la evaluación de los distintos métodos de aireación se conforman tres pilas de compost, aplicando en cada una un método específico. A partir del seguimiento integral del procedimiento de compostaje, se determinan los costos directos asociados a cada alternativa y se evalúa la calidad del producto final en cada caso.

El presente trabajo se desarrolla en el establecimiento “Juan Muñoz S.A.”, el cual cuenta con la finca y la bodega ubicadas en el mismo predio, localizado en Bajo Las Cumbres s/n, distrito de Agrelo, departamento de Luján de Cuyo, provincia de Mendoza, Argentina. La finca cuenta con una superficie cultivada aproximada de 96 hectáreas, compuesta mayormente por vides destinadas a la producción vitivinícola, y en menor medida por cuarteles con especies frutales. La principal actividad económica del establecimiento es la producción de vino, la cual se lleva a cabo en la bodega ubicada dentro del predio.

La selección del establecimiento Juan Muñoz para el presente análisis se fundamenta en el enfoque sustentable de la organización, donde se implementen varias prácticas productivas responsables como el sistema de riego por goteo y la utilización de energía proveniente de fuentes renovables. Entre las prácticas productivas establecidas, destaca la producción de

Comentado [GS1]: si se habla de finca se refiere a la producción primaria, como acá también hay bodega, mejor llamarlo estalbecimiento

Comentado [GS2]: establecimiento Juan Muñoz

compost a gran escala a partir de residuos vitivinícolas, que tiene como objetivo valorizar los subproductos orgánicos generados durante el proceso productivo y utilizarlos como enmienda para los suelos.

Gracias a la predisposición de los dueños de la finca, su experiencia empírica y a la disponibilidad de espacios, insumos y de equipamiento adecuado, esta finca resulta idónea para llevar a cabo un análisis económico y cualitativo de diferentes metodologías de aireación aplicadas a residuos provenientes de la industria vitivinícola.

1.2 Antecedentes y Marco Referencial

1.2.1 Historia del compostaje

Los orígenes del compostaje no pueden atribuirse a una persona o sociedad en particular, pero su práctica se remonta a las primeras comunidades sedentarias, donde la agricultura era la base de la alimentación. A medida que estas civilizaciones comenzaron a cultivar la tierra, también desarrollaron estrategias para mejorar la fertilidad del suelo, utilizando residuos orgánicos como fuente de nutrientes. Este conocimiento empírico se transmitió a lo largo de generaciones, consolidando el uso de materia orgánica en la agricultura (Moreno Casco et al., 2008).

Existen múltiples referencias históricas sobre el empleo de residuos animales como fertilizantes. En tablillas de arcilla del Imperio Acadio, en Mesopotamia, se documenta su uso en la agricultura, al igual que en antiguas civilizaciones de Sudamérica, China, Japón e India, donde se incorporan tanto desechos animales como humanos para devolver nutrientes al suelo y mantener su fertilidad. Textos religiosos, como la Biblia y el Talmud, también mencionan el aprovechamiento del estiércol transformado, al igual que escritos árabes, medievales y renacentistas, que destacan la importancia de estos métodos en la producción agrícola (Epstein, 2011).

Uno de los primeros registros escritos sobre el compostaje se remonta al siglo I d. C., de la mano de Lucio J. Moderato Columela, escritor agronómico romano dedicado a la agricultura a gran escala. En su obra “de re rustica”, compuesta por doce libros sobre los trabajos del campo, Columela (2004) describe prácticas de aprovechamiento de residuos orgánicos para la fertilización. En el Libro II, señala que “el agricultor sabio recoge las hojas, corta los helechos y los mezcla con el guano de las gallinas. Agrega cenizas y la cloaca de las casas, lo mezcla con paja y restos de comida, y lo deposita en un hoyo en la tierra. Se agrega permanentemente agua para que las semillas de plantas se pudran. En verano se debe trabajar y revolver todo el montón para que se genere un buen fertilizante para el campo”.

En Moreno Casco et al. (2008), se detalla que desde el siglo XVII, los ingleses utilizaban el término compost (derivado del latín *compostus*) para referirse a una combinación de tierra, estiércol, restos de plantas, virutas de madera, cenizas, huesos y desechos de cocina, dispuestos en capas y sometidos a un proceso de fermentación.

El químico alemán Justus von Liebig (1803-1873) marcó un hito en la agricultura moderna con la publicación de “Química orgánica aplicada a la agricultura y a la fisiología” en 1840, donde planteó que las plantas requieren nutrientes minerales específicos del suelo y formuló la “ley

del mínimo". Sus aportes sentaron las bases científicas para el desarrollo de los fertilizantes minerales, aunque la producción a gran escala de compuestos nitrogenados recién se alcanzó con el proceso Haber-Bosch a comienzos del siglo XX. De este modo, hacia el período previo a la Primera Guerra Mundial, la combinación de mecanización agrícola y fertilizantes sintéticos comenzó a desplazar progresivamente el uso tradicional de estiércol y compost, en el afán de incrementar la eficiencia y la productividad de los cultivos (Moreno Casco et al., 2008).

Avanzando en el tiempo, el procedimiento de compostaje entró de nuevo en la observación científica y evolucionó en el siglo XX con Sir Albert Howard, quién fue el primer agrónomo en realizar una aproximación científica al compostaje, sistematizando el procedimiento e interesándose en el aspecto de la higienización como en el de la recuperación de nutrientes, iniciando el movimiento de la agricultura ecológica, siendo el compostaje una de las tecnologías de base para la agricultura orgánica y la biodinámica (Moreno Casco et al., 2008).

A partir de la crisis del petróleo de 1973, las tecnologías de compostaje experimentaron un notable avance. En los últimos 50 años, el compostaje se ha consolidado como una de las principales alternativas para el tratamiento de residuos orgánicos. Su importancia radica en la creciente escasez de materia orgánica en los suelos, la limitación de espacios para la disposición final y la implementación de normativas ambientales que restringen el envío de residuos orgánicos a vertederos y buscan reducir las emisiones de CO₂. Además, el compostaje constituye una herramienta clave para el reciclaje de nutrientes dentro de los sistemas agrícolas, contribuyendo a su sustentabilidad al disminuir el uso de fertilizantes sintéticos y mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

1.2.2 Fundamentos técnicos

Rynk (1992) establece al compostaje como un proceso de descomposición aeróbica de la materia orgánica, llevado a cabo por microorganismos bajo condiciones controladas. Este proceso, regulado por la disponibilidad de oxígeno, humedad y temperatura, genera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua, compuestos minerales y una fracción orgánica estabilizada conocida como compost (Véase Figura 1).

Durante el compostaje, la materia orgánica se estabiliza mediante la oxidación de moléculas complejas, transformándolas en compuestos más simples y estables (Buscaglia et al., 2002). Según Moreno Casco et al. (2008), un compostaje bien gestionado reduce la humedad, el peso y el volumen de los residuos, dando lugar a un producto estabilizado, almacenable y transportable, y su aplicación en suelos agrícolas mejora la infiltración y retención de agua, regula la temperatura, reduce la erosión, favorece la sanidad de los cultivos y enriquece el suelo con nutrientes.

Durante el procedimiento de compostaje, la actividad metabólica de bacterias y hongos genera un aumento de temperatura en la pila, lo que favorece la eliminación de patógenos y semillas no deseadas. En el caso de grandes volúmenes de residuos orgánicos, la intervención humana es fundamental para proporcionar condiciones óptimas que permitan el desarrollo adecuado de los microorganismos descomponedores en todo el volumen y espacio del proceso. Esta intervención evita factores que afecten la actividad microbiana, mejorando la eficiencia del proceso y calidad del producto final (Buscaglia et al., 2002).

Rynk (1992) establece que el compostaje requiere la presencia de materia orgánica adecuadamente mezclada, que provea los nutrientes esenciales para estimular la actividad y el crecimiento microbiano. Para ello, es fundamental mantener una relación equilibrada de carbono y nitrógeno (relación C:N). Además, se necesita una población microbiana inicial y condiciones ambientales óptimas que incluyen niveles adecuados de oxígeno para sustentar a la comunidad de microrganismos aeróbicos, así como una humedad suficiente que permita la actividad biológica sin comprometer la aireación del sustrato.

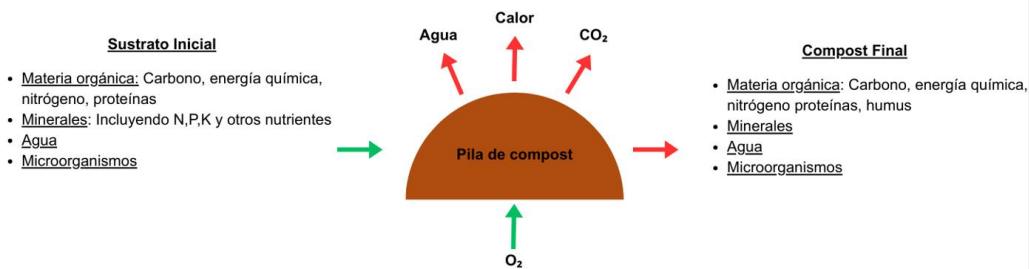


Figura 1: Esquema del proceso de compostaje. Fuente: Rynk, 1992. Traducción propia.

1.2.2.1 Etapas del compostaje

Durante el proceso de compostaje aeróbico, los microorganismos descomponen la materia orgánica utilizando el carbono como fuente de energía y el nitrógeno para su crecimiento y reproducción. Cuando el suministro de oxígeno es limitado o inexistente, la descomposición aeróbica se ralentiza e incluso puede detenerse por completo si no se restablece la oxygenación. Por lo tanto, la aireación cumple un papel esencial al proporcionar el oxígeno necesario para mantener activa la comunidad microbiana aerófila, responsable de una descomposición más eficiente de la materia orgánica (Rynk, 1992).

Moreno Casco (2008) señala que, para obtener un compost de calidad, es fundamental favorecer el desarrollo de microorganismos con metabolismo aeróbico. La concentración de oxígeno en el interior de la pila determina el tipo de metabolismo predominante en la comunidad microbiana responsable de la degradación de la materia orgánica. Cuando el oxígeno es limitado, se favorece el metabolismo fermentativo, el cual resulta menos eficiente, ya que produce menos calor, demora la descomposición de la materia orgánica y genera compuestos indeseables como metano y sustancias responsables de malos olores. En concordancia, Rynk (1992) sostiene que un adecuado suministro de oxígeno otorga una ventaja competitiva a los organismos aeróbicos sobre los anaeróbicos. Por lo tanto, una metodología de compostaje que asegure un mayor aporte de oxígeno favorecerá una descomposición más rápida y eficiente de la materia orgánica a lo largo del procedimiento.

Los métodos de compostaje más tradicionales utilizan el volteo mecánico para restablecer los niveles de oxígeno y para restaurar el espacio poroso dentro de la pila, facilitando así el movimiento del aire a través de los materiales (Rynk, 1992). Otras metodologías de aireación utilizan el intercambio pasivo de aire (convección natural) o a través de aireación forzada, utilizando ventiladores y turbinas.

La comunidad microbiana, mediante sus procesos metabólicos, transforma la materia orgánica en biomasa, liberando energía en forma de calor y generando un sustrato sólido más estable, con menor contenido de carbono y nitrógeno, conocido como compost (Roman et al., 2013). Parte de esta energía térmica eleva la temperatura del sistema, lo que a su vez estimula aún más la actividad microbiana y genera un efecto de retroalimentación que incrementa la producción de calor. Este aumento térmico continúa hasta alcanzar un punto crítico, cercano a los 70 °C, temperatura a la cual la mayoría de los microorganismos no sobrevive. En esta etapa, solo permanecen activas ciertas bacterias termófilas cuya actividad no es suficiente para sostener el calor generado, lo que da inicio a la fase de enfriamiento (Moreno Casco, 2008).

Según la temperatura generada durante el procedimiento, se reconocen 3 etapas principales en el compostaje, estas se clasifican en:

- **Fase Mesófila:**

El sustrato inicial comienza a descomponerse a temperatura ambiente y en horas, debido a la disponibilidad de nutrientes y a los microorganismos presentes en la masa de residuos que están asociados a la generación de energía como producto de su metabolismo, la temperatura aumenta hasta los 45 °C (Antunes et al. 2016). En la fase mesófila predominan las bacterias, levaduras, mohos y actinomicetos mesofílicos, que descomponen elementos fácilmente degradables como los azúcares, el almidón, las proteínas y las grasas (Lavado, 2012).

Según Moreno Casco et al. (2008), la actividad de bacterias oxidativas y fermentativas, degradadoras de este tipo de compuestos, generan ácido láctico ocasionando una disminución del pH. Además, la actividad metabólica de los microorganismos en esta etapa aumenta la temperatura de la masa de residuos, ocasionando la transición de la microbiota mesófila a termófila, la cual se encuentra en estado latente en los residuos. En la etapa mesófila es imprescindible mantener buenas condiciones de humedad y aireación, para favorecer la actividad metabólica de la microbiota (Lavado, 2012).

- **Fase Termófila:**

Cuando la temperatura de la pila se encuentra entre los 45 °C y 75 °C, se da inicio a la fase termófila. En esta etapa, que puede durar desde algunos días hasta varias semanas, proliferan los organismos termotolerantes y termófilos, mientras que los organismos no termotolerantes, que incluyen patógenos y parásitos son eliminados (Moreno Casco et al., 2008).

Estos microorganismos termotolerantes y termófilos favorecen la descomposición del material vegetativo con poder germinativo que existe en el sustrato inicial como también de ceras, proteínas, hemicelulosas y escasamente lignina y celulosa (Peñafiel Rodríguez, 2010). Producto de su metabolismo, liberan nitrógeno en forma de amoníaco, lo que provoca un aumento del pH del sustrato (Román et al., 2013). Buscaglia (2002) establece que esta etapa es de gran interés por la higienización que se realiza en el material de partida, por lo que es muy conveniente su prolongación hasta el agotamiento de nutrientes.

Cuando la temperatura supera los 60 °C, el exceso de calor comienza a inhibir la actividad microbiana y reduce la solubilidad del oxígeno en el agua. En ausencia de un suministro adecuado de oxígeno, la actividad de los microorganismos se ve limitada, especialmente a medida que la fuente de carbono disponible se agota. Como consecuencia, la temperatura de la pila comienza a descender progresivamente, marcando el inicio de la segunda fase mesófila del proceso de compostaje (Moreno Casco et al., 2008).

- **Segunda etapa mesófila:**

A medida que disminuyen las fuentes disponibles de nitrógeno y se incrementa la proporción de compuestos orgánicos más resistentes, la velocidad de descomposición y el consumo de oxígeno se reducen notablemente. Esta disminución en la actividad metabólica provoca un descenso gradual de la temperatura de la pila, que alcanza aproximadamente los 40 °C, lo que permite la recolonización del sustrato por microorganismos mesófilos (Ros Muñoz, 2012-2014). Con el paso de los días, esta comunidad microbiana mesófila se torna más estable y diversa, continuando la degradación de los compuestos más complejos, como la celulosa y la lignina, que quedan parcialmente alterados.

- **Etapa de maduración:**

Según Román et al. (2013), esta etapa, que puede prolongarse durante varios meses a temperatura ambiente, y se caracteriza por la ocurrencia de reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados. Estos procesos dan lugar a la formación de moléculas más complejas y estables, como los ácidos húmicos y fúlvicos, lo que permite obtener un compost estable con propiedades similares a las del humus.

1.2.2.2 Factores que afectan el proceso de compostaje

La argumentación de este apartado se fundamenta principalmente en las investigaciones, y experiencias sobre la aplicación de tecnologías de compostaje recopiladas por Moreno Casco et al. (2008) y Rynk (1992). Los resultados presentados por estos autores resultan esenciales para complementar los objetivos de esta tesis, ya que aportan conocimientos que no podrían ser generados de manera independiente por el autor.

- **Oxígeno**

El sistema de aireación elegido debe garantizar la disponibilidad de un mínimo del 5 % de oxígeno dentro de la pila para evitar la anaerobiosis, siendo ideal valores mayores al 12 % de oxígeno dentro de la pila.

Si no hay un adecuado suministro de oxígeno, la descomposición de la materia orgánica se realiza de forma anaeróbica, la cual involucra diferentes tipos de organismos que generan reacciones bioquímicas diferentes. La descomposición anaeróbica ralentiza el proceso de compostaje y genera la acumulación de compuestos inestables generadores de malos olores como metano, ácidos orgánicos, sulfuro de hidrógeno y otras substancias que son descompuestas cuando se logran restablecer los niveles de oxígeno.

Un adecuado suministro de oxígeno otorga una ventaja competitiva a los microorganismos aeróbicos frente a los anaeróbicos. Además de garantizar la oxigenación necesaria para estos organismos, la aireación de la pila cumple una función clave en la eliminación del calor, el vapor de agua y los gases acumulados en el interior del sustrato. Según Rynk (1992), la cantidad de aire requerida para disipar el calor generado durante el compostaje es hasta diez veces mayor que la necesaria para satisfacer la demanda de oxígeno de los microorganismos. Por este motivo, el sistema de aireación seleccionado incide de forma directa en la duración y eficiencia de las distintas fases del proceso de compostaje.

- **Temperatura**

La descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos genera calor como resultado de su actividad metabólica. Debido a las propiedades aislantes del material orgánico, este calor liberado durante el proceso de descomposición de la materia orgánica se

acumula dentro de la pila lo que provoca un incremento progresivo de la temperatura en el interior de la pila.

Tanto la altura como el ancho de la pila de compost influyen directamente en la temperatura de la misma. Las pilas muy altas logran que el sustrato pueda llegar fácilmente a su fase termófila, pero se dificulta la oxigenación de la parte central de la pila y una pila de baja altura y de base ancha, puede tener buena humedad inicial y buena relación C:N pero hacen que el calor generado por los microorganismos se pierda fácilmente, de tal forma que los pocos grados de temperatura que se logran, no se conservan (Román, 2013).

La temperatura, al estar directamente relacionada con la actividad metabólica de los microorganismos, constituye un parámetro clave para evaluar el desarrollo del proceso de descomposición microbiana. Su monitoreo es esencial tanto para asegurar el adecuado avance del compostaje como para verificar que se alcancen las condiciones necesarias para la higienización del material orgánico.

El compostaje se desarrolla en dos rangos de temperatura: etapa mesófila (15 – 45 °C) y etapa termófila (por encima de los 45 °C). Ambas fases son fundamentales para permitir que los distintos grupos de microorganismos se desarrollen y degraden la materia orgánica, ya que cada tipo de organismo se especializa en consumir distintos tipos de compuestos orgánicos.

La pila alcanza su temperatura máxima entre los 2 y 10 días posteriores a su conformación, y esta puede mantenerse desde algunos días hasta varios meses. La duración de este período depende tanto de las propiedades del material compostado como del grado de control ejercido sobre el proceso (Castells, 2005).

Román et al., (2013), indican que, si la pila no alcanza temperaturas superiores a los 35 °C, puede deberse a una humedad insuficiente, una geometría inadecuada de la pila o una relación C:N incorrecta, factores que reducen la actividad microbiana y, por ende, la generación de calor.

Como la principal pérdida de calor durante el compostaje ocurre por la evaporación del agua, es importante evitar que la humedad de los materiales descienda por debajo del 40 %. Niveles de humedad demasiado bajos pueden favorecer el daño en los microorganismos por alta temperatura y aumentar el riesgo de combustión espontánea.

- Humedad

La humedad es un factor de control clave, ya que las actividades relacionadas con el crecimiento y división celular requieren condiciones de humedad óptima. La presencia de agua dentro de la pila también es fundamental para el transporte de sustancias y nutrientes, de forma que estos se encuentren disponibles para los microorganismos.

Cuando el contenido de humedad desciende por debajo del 40 %, la actividad microbiana —especialmente la bacteriana— se ve significativamente reducida, aunque los hongos toleran niveles de humedad más bajos. Si la humedad cae por debajo del 20 %, se inhibe casi por completo la actividad biológica, deteniendo el proceso de compostaje.

Por el contrario, cuando el contenido de humedad supera el 60 %, los poros del sustrato se saturan, lo que limita la circulación del aire y reduce la absorción de oxígeno. Esta condición provoca la acumulación de compuestos de desecho, la generación de malos olores y la aparición de ambientes anaeróbicos, que afectan negativamente el desarrollo adecuado del proceso de descomposición de la materia orgánica.

Tomando en cuenta la realidad del trabajo diario de un agricultor en el campo, la imposibilidad de acceso a un laboratorio para hacer análisis de las etapas de avance del proceso de

compostaje y el factor de los costos implicados (que siempre está presente cuando se evalúa la aplicación de tecnologías), la estimación del contenido de humedad del sustrato se realiza mediante el método manual conocido como “prueba del puño”. Esta técnica consiste en tomar una porción representativa del material preparado en la pila con la mano, comprimirla y observar la reacción del sustrato. A partir de esta evaluación pueden identificarse tres escenarios:

- **Exceso de humedad**: cuando el contenido supera el 60 %, al apretar la muestra se observa goteo de agua, lo que indica un exceso de humedad en la pila.
- **Humedad óptima**: se presenta cuando la humedad está entre el 40 % y menos del 60%. En este caso, la muestra no gotea al ser comprimida, mantiene su forma al abrir la mano, y presenta una textura húmeda sin desgranarse.
- **Déficit de humedad**: cuando el contenido de humedad es inferior al 40 %, la muestra se desmorona al liberar la presión, sin mantener forma ni cohesión, lo que evidencia la necesidad de riego.

- **Relación C/N**

Carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son los elementos fundamentales requeridos por los microorganismos durante el proceso de compostaje, siendo el equilibrio entre carbono y nitrógeno el factor más determinante en el desarrollo eficiente del proceso.

El carbono es utilizado como fuente de energía, mientras que el nitrógeno es indispensable para la síntesis de proteínas y el crecimiento microbiano. El fósforo y el potasio, por su parte, cumplen funciones esenciales a nivel metabólico. En general, estos elementos se encuentran en concentraciones adecuadas en el sustrato inicial para sostener la actividad biológica.

Para asegurar un proceso de compostaje eficiente y obtener un compost de buena calidad, es necesario que la relación C:N del sustrato inicial esté dentro de un rango adecuado, preferentemente entre 20:1 y 40:1. A medida que avanza el compostaje, esta relación se reduce naturalmente, alcanzando valores cercanos a 10:1 en el compost maduro (Epstein, 2011).

Comenzar el procedimiento de compostaje con una relación C:N menor a 20:1 implica una rápida utilización del carbono disponible, lo que impide la estabilización del nitrógeno, generando pérdidas en forma de amoníaco (NH_3) y óxidos de nitrógeno (N_2O) y favoreciendo la aparición de olores desagradables. En cambio, relaciones superiores a 40:1 suponen un exceso de carbono, lo que prolonga el tiempo necesario para completar el proceso de compostaje.

- **pH**

El pH varía a lo largo del proceso de compostaje y está influenciado principalmente por la composición inicial del sustrato. A lo largo del ciclo, pueden distinguirse tres fases con comportamientos diferenciados del pH. En la etapa inicial, los valores suelen oscilar entre 5 y 7, dependiendo del tipo y la proporción de los materiales orgánicos utilizados (Sánchez Monedero et al., 2001).

Durante la primera fase mesófila, la intensa degradación de carbohidratos simples y complejos por parte de bacterias y hongos genera una gran cantidad de ácidos orgánicos, como el acético y el láctico, que al acumularse provocan un descenso del pH de la pila. Cuando el medio se vuelve más ácido ($\text{pH} < 6$), disminuye la actividad bacteriana y cobran protagonismo los hongos acidotolerantes, capaces de metabolizar estos ácidos y participar en la proteólisis. Este proceso libera grupos amino que se transforman en amoníaco (NH_3), una base que eleva progresivamente el pH, marcando el paso hacia condiciones alcalinas en la fase termófila, donde se pueden alcanzar valores cercanos a 8,5.

En la segunda fase mesófila, el pH tiende nuevamente a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos con capacidad buffer o amortiguadora (Sánchez Monedero et al., 2001). Por esta razón, independientemente del pH de los materiales de partida, el proceso de compostaje tiende a producir un producto final con un pH estable y cercano a la neutralidad.

Las bacterias presentes en la pila se desarrollan óptimamente en un rango de pH de 6 a 7,5, mientras que los hongos muestran una mayor tolerancia, adaptándose a un espectro más amplio de 5,5 a 8. Dado que en el compostaje se busca favorecer el crecimiento de la comunidad de bacterias aeróbicas por su alto poder degradativo, resulta fundamental mantener un pH adecuado para su desarrollo. Por ello, un aspecto clave al diseñar un procedimiento de compostaje a escala industrial es evitar el uso de materias primas con un contenido excesivo de nitrógeno. Una baja relación C:N puede promover la conversión de compuestos nitrogenados en amoníaco (NH_3), incrementando la alcalinidad del medio, reduciendo la eficiencia de la descomposición y afectando negativamente la calidad del producto final.

- Porosidad, estructura, textura y tamaño de la partícula

La porosidad y la estructura del sustrato influyen directamente en el proceso de compostaje, ya que afectan la aireación dentro de la pila.

La porosidad se define como la proporción de aire presente dentro de la pila de compost y es un factor clave que determina la resistencia al flujo de aire. Esta propiedad está influenciada por el tamaño de las partículas del sustrato y por la continuidad de los espacios de aire libres entre ellas. Una adecuada homogeneización del material a compostar permite que las partículas se acomoden de forma tal que se garantice una distribución uniforme de los poros dentro de la pila, lo que favorece el flujo de aire y asegura un suministro adecuado de oxígeno, esencial para la actividad de las bacterias aeróbicas.

La estructura del sustrato se refiere a la capacidad de las partículas para resistir fuerzas de compresión sin colapsar. El uso de materiales que aportan buena estructura a la pila ayuda a preservar la porosidad, evitando la compactación excesiva y la aparición de condiciones de anoxia, que pueden obstaculizar el desarrollo adecuado del procedimiento de compostaje.

La mayor parte de la descomposición aeróbica durante el compostaje ocurre en la superficie de las partículas, ya que el oxígeno se difunde con facilidad en estado gaseoso a través de los poros, pero su movimiento es mucho más lento en las fases líquida y sólida del sustrato. En la película líquida que recubre cada partícula se establece una población de microorganismos aeróbicos, que consumen el oxígeno disponible en esa zona superficial. Como consecuencia, el interior de las partículas de materia orgánica permanece en condiciones anaeróbicas. A medida que los microorganismos continúan con su actividad degradativa, la partícula se reduce de tamaño y la descomposición progresiva hacia el interior de la partícula (Véase Figura 2).

Debido a la forma en que progresa la actividad degradativa de la materia orgánica, el tamaño de partícula influye de manera directa en la eficacia del proceso de compostaje. Partículas de menor tamaño inicial presentan una mayor superficie de contacto para la acción microbiana, lo que facilita la degradación del sustrato y contribuye al aislamiento térmico, favoreciendo el mantenimiento de temperaturas óptimas durante el proceso. Sin embargo, cuando las partículas son excesivamente pequeñas, pueden provocar la compactación del sustrato, lo que genera condiciones de anoxia que inhiben la actividad microbiana aeróbica.

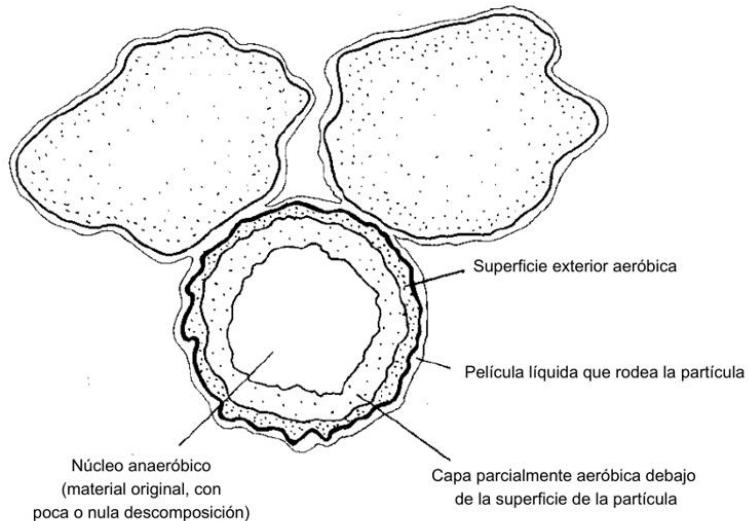


Figura 2: Proceso de descomposición de las partículas sólidas de materia orgánica. Fuente: Rynk, 1992. Traducción propia.

- **Materia orgánica**

A lo largo de todo el ciclo de compostaje, el contenido de materia orgánica disminuye como resultado de la mineralización de los compuestos más sencillos y de la pérdida de carbono en forma de CO_2 . Este proceso conlleva una reducción del volumen de la pila y una disminución de la relación C:N (Bernal et al., 2009).

En la fase de maduración, tienen lugar reacciones de síntesis que dan origen a compuestos orgánicos más complejos, en un proceso conocido como humificación. Estos compuestos presentan propiedades físicas y químicas distintas a las del material original (Ros Muñoz, 2012-2014).

- **Conductividad Eléctrica (CE)**

La conductividad eléctrica es una propiedad intrínseca del material a compostar y está relacionada con la concentración de sales solubles presentes en el sustrato (Bueno Márquez et al., 2008). Cuando esta concentración de sales es elevada, se considera que el compost posee una alta conductividad eléctrica, lo cual puede afectar negativamente en el crecimiento vegetal.

La conductividad eléctrica (CE) puede aumentar durante el proceso de compostaje como consecuencia de la formación de sales derivadas de la mineralización de la materia orgánica, así como por la disminución del lixiviado de sales (Huang et al., 2004).

El límite aceptable de conductividad eléctrica (CE) depende del uso final previsto para el compost y está determinado por la normativa vigente correspondiente, que en el caso de la República Argentina se encuentra definido en el Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost, Resolución Conjunta 1/19.

1.2.2.3 Técnicas de compostaje

Rynk (1992), explica que el estiércol y otros residuos orgánicos albergan microorganismos que pueden descomponer la materia tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas; sin embargo, para que el proceso de compostaje sea rápido y con una baja emisión de olores, es fundamental mantener un nivel adecuado de oxígeno.

La elección de la técnica de compostaje más adecuada depende del uso previsto del compost, las características del productor, el volumen de material a tratar y el tipo de materia prima disponible (Lavado, 2012).

Para el compostaje a gran escala existen dos grandes tipos de metodologías de las cuales se desprenden determinadas tecnologías. La primera metodología se basa en todos los sistemas abiertos, los cuales se encuentran al aire libre y se diferencian por el tipo de aireación utilizado. La segunda metodología es el de sistemas cerrados, donde la materia orgánica se descompone sin tener contacto directo con el medio exterior.

- 1) **Sistemas abiertos:** Para compostar grandes volúmenes de materia orgánica de manera rápida, la conformación de pilas es el método más eficiente para establecer un sistema de aireación adecuado. En los sistemas abiertos, las pilas se construyen al aire libre, quedando expuestas a las condiciones climáticas.

a- Pilas estáticas con aireación natural:

Este sistema de compostaje se caracteriza por carecer de cualquier tipo de tecnología para su aireación, empleando un mínimo de mano de obra y equipamiento. La aireación de la pila se produce principalmente por convección natural. El calor producido durante la descomposición de la materia orgánica eleva la temperatura de los gases dentro del sustrato, lo que reduce su densidad. Esto provoca la liberación de los gases desde adentro de la pila hacia el exterior de la pila en un movimiento ascendente, generando un vacío que facilita y provoca la entrada lateral de aire fresco externo (Véase Figura 3).

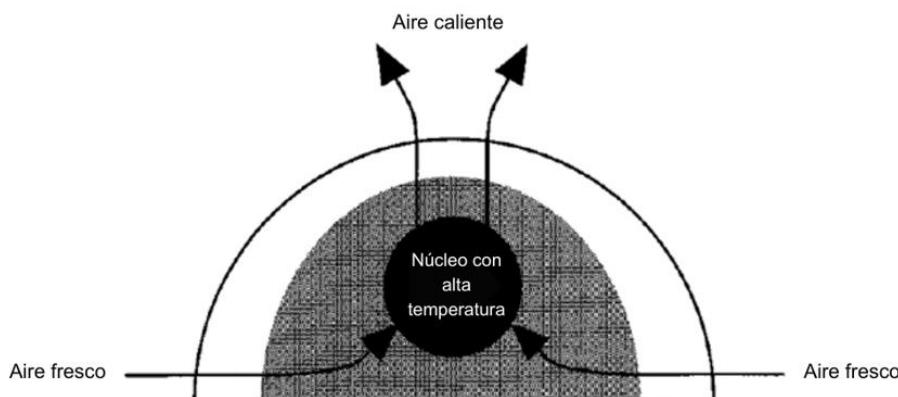


Figura 3: Movimiento del flujo de aire dentro de una pila de compostaje con aireación natural; plano trasversal. Fuente: Rynk, 1992. Traducción con modificación propia.

La eficiencia de este mecanismo depende tanto de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la pila como, especialmente, de la resistencia que el sustrato

opone al paso del aire. Por ello, al utilizar esta metodología de aireación, es fundamental iniciar el proceso con un sustrato que presente una estructura que otorgue buena porosidad y una adecuada relación C:N, con el fin de prevenir la aparición de procesos de descomposición anaeróbica y la generación de olores indeseados.

Debido a la ausencia de volteos la circulación de aire dentro de la pila es limitada, y este tipo de aireación tiende a conservar altas temperaturas durante más tiempo. Además, la escasez de oxígeno ralentiza los procesos microbiológicos que ocurren en el interior de la pila, prolongando la maduración del compost.

La falta de volteo, además de favorecer la acumulación de calor y humedad en zonas específicas, provoca que a medida que el material de la pila se descomponga, la estructura en su base se deteriore y pierda porosidad, lo que impide el adecuado flujo de oxígeno en esa zona. Esto reduce la actividad microbiana y genera un compost final más heterogéneo en su composición (USDA — NRCS, 2010).

Con una adecuada estructura y un buen control de temperatura y humedad, estos sistemas deben funcionar correctamente. Las pilas estáticas pueden construirse directamente sobre suelo desnudo o sobre una cama de material poroso, el cual mejora la oxigenación en la parte inferior de la pila y facilita el drenaje del agua de riego. El agricultor sin embargo debe tomar en cuenta las inclemencias de la meteorología de su lugar y las condiciones del clima de la zona geográfica regional.

b- Pilas estáticas con aireación pasiva:

Este sistema de aireación evita el volteo y para su aireación utiliza chimeneas perforadas que pueden colocarse de manera horizontal o verticalmente dentro de la pila. Estas chimeneas se encuentran abiertas al exterior en ambos extremos, por lo que permanentemente circula aire fresco dentro de ellas. Las perforaciones en la cubierta lateral de la chimenea permiten que los gases calientes provenientes del interior de la pila entren en la chimenea y por convección asciendan y se liberen al exterior.

Según Rynk (1992), la mayor acumulación de calor ocurre en la zona central de la pila, por ello, una estructura y porosidad adecuadas del sustrato, junto con el uso de chimeneas abiertas dispuestas en el eje central de la pila, permiten mejorar la aireación en esa área sin necesidad de realizar grandes inversiones ni emplear mucha mano de obra.

Al igual que las pilas estáticas con aireación natural, las pilas equipadas con chimeneas pueden construirse directamente sobre el suelo desnudo o sobre una base que facilite la circulación de aire en la parte inferior, como un colchón de escobajo o una estructura de pallets. En este estudio, se hace referencia a los pallets de camión, que, una vez fuera de uso, resultan especialmente útiles para proporcionar una estructura resistente donde establecer la pila, requerida en este tipo de sistemas estáticos. Su empleo, además, contribuye a optimizar la inversión en el proceso de compostaje al reutilizar materiales disponibles

c- Pilas estáticas con aireación forzada:

Este sistema prescinde de volteos, y el suministro de aire se realiza de forma mecánica mediante sopladores/ventiladores conectados a tuberías perforadas ubicadas en la base de la pila. Estos sopladores inyectan aire a presión positiva o negativa a través de las cañerías, favoreciendo la oxigenación del sustrato.

Cuando la pila está conformada por un sustrato con buena porosidad, bien estructurada y con un suministro de aire distribuido de manera uniforme, los tiempos del proceso de compostaje con este tipo de aireación, pueden acortarse significativamente.

Debido a la gran variedad de combinaciones posibles entre sistemas, estrategias de control y configuraciones de equipos, esta metodología de aireación requiere de experiencia empírica para su correcta implementación. También requiere de la gestión de suministro eléctrico, inversión en equipamiento, la planificación de un diseño técnico adecuado y la consideración del consumo energético asociado al uso continuo de sopladores.

d- Pilas con volteo:

En este sistema, las pilas se construyen sobre suelo desnudo o sellado por hormigón o asfalto y el volteo se realiza mediante una retroexcavadora o un tractor equipado con un implemento especializado. Los volteos se efectúan mientras y/o después del riego, con el objetivo de evitar zonas anóxicas y asegurar una distribución homogénea de la humedad a lo largo de toda la pila.

Las ventajas de este método radican en la adecuada oxigenación del sustrato, lo que favorece una aceleración del proceso de compostaje y contribuye a obtener un producto final más homogéneo. Entre sus desventajas se destacan los costos asociados a la mano de obra, la necesidad de maquinaria especializada y la disponibilidad de un espacio amplio para operar dichos equipos.

- 2) **Sistemas cerrados:** En estos sistemas el material a compostar no está nunca en contacto directo con el exterior.

a- Túneles estáticos:

Esta tecnología consiste en la construcción de sistemas cerrados en las tres (3) dimensiones (largo, ancho, altura) como por ejemplo contenedores de hormigón, generalmente de unos 3 a 5 metros de altura, 4 a 5 metros de ancho y entre 20 y 30 metros de largo. Estos túneles están equipados con un sistema de aireación forzada o pasiva, así como con dispositivos automatizados para el control de temperatura, humedad, niveles de oxígeno, recolección de gases y lixiviados, y un sistema de riego.

Este sistema presenta ventajas significativas frente a métodos más simples, ya que permite mantener valores constantes y controlados de variables críticas, además de facilitar la captura de gases y lixiviados. No obstante, sus principales desventajas radican en los elevados costos de inversión y operación. Por ello, si el productor no planea especializarse exclusivamente en la producción de compost, con una clientela de compra confiable y a gran escala, esta tecnología puede no resultar económicamente viable.

b- Cilindros rotatorios:

Esta metodología emplea reactores con forma de tambor rotatorio que giran de manera lenta sobre su eje principal. El volteo, ya sea continuo o intermitente, permite mezclar el material en el interior del tambor, facilitando su exposición al aire fresco, el intercambio de oxígeno y la liberación del calor y los gases generados durante el proceso de descomposición.

Sus ventajas son el elevado grado de control de parámetros críticos y la flexibilidad del proceso, teniendo una buena adaptación a cualquier tipo de material y disminuyendo

el uso de agua y oxígeno. Su mayor desventaja es su costo de inversión inicial en comparación con otras tecnologías.

1.2.2.4 Marco Legal

En la Cumbre de la Tierra realizada en Río de Janeiro en 1992, Argentina firmó compromisos internacionales que impulsaron una visión del ambiente como un derecho humano fundamental. Estos compromisos internacionales influyeron notablemente para la creación del artículo 41, el cual fue integrado a la Constitución Nacional en su reforma de 1994.

El artículo 41 de la Constitución Nacional garantiza el derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras. Según este artículo, las autoridades de aplicación proveerán a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambientales. Además, corresponde a la Nación dictar las normas que contengan los presupuestos mínimos de protección, y a las provincias, las necesarias para complementarlas, sin que aquéllas alteren las jurisdicciones locales (Art. 41, 1994).

La creación del artículo 41 sentó las bases para la creación de una ley marco ambiental que estableciera principios, instrumentos y políticas en materia ambiental. Es por esto, que en 2002, se promulgó a nivel nacional la Ley General del Ambiente N° 25.675, la cual incorpora principios orientados a la prevención y minimización del impacto ambiental, la responsabilidad de los generadores de residuos, la participación ciudadana y la educación ambiental.

En 2004 se sanciona la Ley Nacional de Gestión Integral de Residuos Domiciliarios N° 25.916, la cual se basa y complementa los principios enunciados en la Ley General del Ambiente, estableciendo estándares mínimos nacionales para la gestión de residuos domiciliarios, que las provincias deben respetar o mejorar, siguiendo lo que dice el artículo 41 de la Constitución Nacional.

La Ley N° 25.916 establece entre sus objetivos lograr un adecuado y racional manejo de los residuos domiciliarios mediante su gestión integral, a fin de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población; promover la valorización de los residuos domiciliarios, a través de la implementación de métodos y procesos adecuados; minimizar los impactos negativos que estos residuos puedan producir sobre el ambiente, así como lograr la minimización de los residuos con destino a disposición final.

En el artículo 25 de la mencionada ley se establece las funciones de la Autoridad de Aplicación dentro de las cuales se encuentran: promover la participación de la población en programas de reducción, reutilización y reciclaje de residuos; fomentar, a través de programas de comunicación social y de instrumentos económicos y jurídicos, la valorización de residuos, así como el consumo de productos en cuya elaboración se emplee material valorizado o con potencial para su valorización y promover e incentivar la participación de los sectores productivos y de comercio de bienes en la gestión integral de residuos.

Dentro de las acciones principales de dicha ley, se impulsa la elaboración de normas técnicas para el compostaje de la fracción biodegradable de los residuos sólidos urbanos respecto a la materia prima, el proceso y la calidad agronómica, con miras a promover el uso del compost que se ajuste a dichas normas de calidad, por parte de la administración pública nacional (SCyMA y SENASA, 2019).

A partir del marco legal descrito, la Secretaría de Control y Mantenimiento ambiental y el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) aprobaron en el año 2019

la Resolución Conjunta (1/2019), que establece el marco normativo para la producción, registro y aplicación de compost (SCyMA y SENASA, 2019).

Esta resolución tiene como objetivo definir las formas en que se puede utilizar el compost elaborado a partir de residuos orgánicos que se separan en el lugar de origen y se recolectan de manera diferenciada, además de establecer los requisitos que debe cumplir para su registro. Busca así garantizar una gestión sostenible y fomentar la producción, el uso y la aplicación del compost en las distintas provincias. Entre otros aspectos, la norma determina las responsabilidades y funciones de la Secretaría de Control y Monitoreo Ambiental y del Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria; los requisitos sanitarios y criterios para clasificar el compost maduro; los procedimientos para su análisis y registro; y los límites y parámetros de calidad que debe cumplir.

La resolución define al compostaje como un proceso controlado de transformación biológica de la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas y termófilas. Por acción microbiana deben transcurrir tres etapas diferentes y en el orden enunciado: 1) Una primera etapa mesófila; 2) Una etapa termófila; 3) Una segunda etapa mesófila (o de maduración). Estas etapas son obligatorias para la realización de compost, el cual es definido como un producto higienizado, estable y maduro que resulta del proceso de compostaje.

1.2.2.5 Calidad del compost

La calidad del compost se define como la aptitud para satisfacer las necesidades de las plantas, minimizando el impacto ambiental y sin representar riesgos para la salud pública (Ansorena et al., 2014). Esto implica que la calidad del compost no se determina por la apariencia o por el hecho de diferenciarse del material que le dio origen, sino por la presencia de propiedades que favorecen el crecimiento vegetal como el aporte de nutrientes o la mejora de las características del suelo, por ser un producto estable que no genere contaminación del suelo, el agua o el aire (ya sea por lixiviados, olores, etc.), y por estar libre de patógenos (bacterias, virus o parásitos) que puedan afectar a quienes lo manipulan o a quienes consuman alimentos cultivados con él.

Teniendo en cuenta esta definición, en la Resolución 1/2019 se establecen dos clases (A y B) de compost según los parámetros de calidad listados en la Tabla N° 3 del Anexo IV:

- **Compost Clase A:** producto que cumple con los requisitos y límites establecidos en la Tabla N° 3 del Anexo IV para clase A. Este producto no presenta restricciones de uso ni de aplicación.
- **Compost Clase B:** producto que cumple con los requisitos y límites establecidos en la Tabla N° 3 del Anexo IV para clase B. Para la aplicación de compost clase B deberá contemplarse la dosis anual de carga y la carga máxima admitida de elementos potencialmente tóxicos según los valores límites indicados en la Tabla N°5 del Anexo IV de la normativa.

Parámetros	Clase A	Clase B
pH	5,0 - 8,5	5,0 - 8,5
Olores	No debe presentar olores desagradables	No debe presentar olores desagradables
Humedad (%)	< 60	< 60

Conductividad Eléctrica (CE ds/m)	< 4	< 6
Relación C:N (%)	≤ 20	< 30
Materia Orgánica (MO%)	≥ 20	≥ 20
Elementos potencialmente tóxicos (mg/kg Materia Seca)		
Cadmio	1,5	3
Cobre	150	450
Cromo total	100	270
Mercurio	0,7	5
Níquel	30	120
Plomo	100	150
Zinc	300	1100
Arsénico	15	30

Cuadro 1: Tabla N° 3 del Anexo IV de la Resolución 1/2019. Fuente: Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost, Resolución Conjunta 1/2019.

Elementos potencialmente tóxicos	Valor límite (kg (ha/año))	Carga máxima admitida (kg/ha)
Cadmio	0,15	0,5
Cobre	12	40
Cromo total	3	10
Mercurio	0,1	0,3
Níquel	3	10
Plomo	15	50
Zinc	30	100
Arsénico	0,5	1,8

Cuadro 2: Tabla N° 5 del Anexo IV de la Resolución 1/2019. Fuente: Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost, Resolución Conjunta 1/2019.

1.2.2.6 Aspectos técnicos en el desarrollo y control del compostaje

Un procedimiento de compostaje industrial debe desarrollarse en un espacio especialmente acondicionado para tal fin, ya que implica una operación a gran escala. Esto se debe a que el compostaje a gran escala requiere una inversión inicial significativa, un espacio suficiente para el manejo de equipos, el abastecimiento de grandes volúmenes de materia prima, insumos, mano de obra, suministro de agua y, en algunos casos, electricidad. Además, demanda un control riguroso de las condiciones del procedimiento. Todo esto tiene como finalidad obtener grandes cantidades de compost, ya sea para su aplicación agronómica en el mismo lugar o para su comercialización (Llaver, 2021).

Para que el procedimiento de compostaje de residuos vitivinícolas a gran escala se lleve a cabo correctamente se deben realizar las siguientes etapas:

Selección y caracterización de materiales: En primer lugar, es fundamental identificar los materiales disponibles y aptos para el compostaje que constituirán el sustrato. En el caso de los residuos vitivinícolas, se emplean los subproductos generados durante la vinificación. A estos materiales se les adiciona estiércol de vaca y de caballo, con el objetivo de mejorar las características físico-químicas del sustrato compostable.

Una vez seleccionados los materiales a compostar, se deben caracterizar sus propiedades intrínsecas con el fin de establecer una mezcla equilibrada, que permita obtener un sustrato con una relación C:N adecuada, así como una buena estructura, porosidad y un tamaño de partícula óptimo.

Selección de lugar: El compostaje a gran escala requiere de un espacio amplio y de un sitio que cuente con acceso a recursos esenciales, como agua y en caso de ser necesario, electricidad. Además, debe permitir el ingreso y la circulación de vehículos y maquinarias que faciliten el manejo adecuado de todo el procedimiento. En este caso de estudio, el playón de compostaje debe ser cuidadosamente seleccionado, considerando todas estas características, con el fin de evitar contratiempos operativos a lo largo de todo el proceso.

Definición de tecnología a aplicar: Teniendo en cuenta el uso final previsto para el compost, el marco legal, los costos económicos asumibles, así como la disponibilidad de materiales y mano de obra, se definen las tecnologías a emplear para mantener bajo control los distintos parámetros del procedimiento de compostaje.

En particular, es fundamental considerar los métodos de aireación y riego de las pilas, ya que inciden directamente en la eficiencia y calidad del proceso de compostaje. Además, representan las actividades con mayor impacto en los costos operativos y en la demanda de mano de obra, por lo que su correcta planificación es clave para la viabilidad del procedimiento.

Pretratamiento: Dado que en el caso para esta tesis, los materiales utilizados como sustrato para el compostaje de residuos vitivinícolas (orujo agotado, escobajo, estiércol de vaca y de caballo) presentan adecuadas características estructurales, se prescinde de la etapa de trituración, procediendo únicamente a la mezcla de los componentes para conformar una pila homogénea de sustrato.

Procedimiento de compostaje propiamente dicho: Durante esta etapa se lleva a cabo el procedimiento de compostaje utilizando la tecnología seleccionada y realizando el control de diversos parámetros clave. Para garantizar un desarrollo óptimo del proceso, se ejecutan las actividades necesarias, como el riego y los volteos, en caso de ser requerido.

Post Tratamiento: Luego de terminar con la etapa de maduración para estabilizar el compost, reducir la fitotoxicidad y favorecer la formación de compuestos húmicos, se puede o no tamizar el material para eliminar fragmentos gruesos o mal descompuestos, los cuales pueden

incorporarse como inóculo y estructurantes en nuevas pilas. También, se lleva a cabo un control de calidad mediante análisis de parámetros como la relación C:N, pH, conductividad eléctrica, estabilidad y madurez.

Finalmente, el producto se almacena en condiciones secas y ventiladas para evitar reactivación microbiana, y puede ser aplicado directamente al suelo o envasado para su comercialización como fertilizante orgánico.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Determinar el método de aireación más eficiente para el compostaje en pilas al aire libre sin cubierta de residuos orgánicos provenientes del establecimiento Juan Muñoz S.A. en Mendoza, evaluando de forma conjunta su costo económico y la calidad del compost generado.

2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar los costos económicos asociados a tres diferentes metodologías de compostaje de residuos vitivinícolas.
- Determinar en qué categoría, según las clasificaciones establecidas por la Resolución Conjunta 1/2019, se ubican los compost obtenidos en los tres procesos de aireación evaluados.

3. Metodología y materiales

El trabajo de campo de la presente tesis se realizó entre el 1 de marzo y el 10 de junio de 2025 en las instalaciones del establecimiento Juan Muñoz S.A. La elección de este sitio se fundamenta en la plena predisposición de los propietarios para acompañar el desarrollo del proyecto, así como en la existencia de una bodega en funcionamiento dentro del establecimiento. Esto garantiza un suministro continuo de material orgánico para el proceso de compostaje, práctica que se lleva a cabo en la finca desde hace varios años.

Durante el proceso productivo del vino, en Mendoza existen dos momentos clave en el año en los que se genera una significativa cantidad de residuos orgánicos: la vendimia, que se extiende aproximadamente desde febrero hasta mayo, y la etapa de elaboración del vino, que se desarrolla entre marzo y mayo. Entre ambos, los residuos generados durante la elaboración del vino son principalmente orujo de uva agotado y escobajo, los cuales presentan un alto potencial para ser aprovechados mediante compostaje (Morales Vera, 2023).

La práctica de compostaje implementada en el establecimiento se realiza con el objetivo de producir una enmienda para las distintas parcelas de vid. Según lo señalado por el ingeniero agrónomo encargado de la finca, la aplicación de compost en estos cuarteles, si bien requiere tiempo para evidenciar resultados, ha mostrado efectos positivos: las plantas presentaron un crecimiento superior y un estado sanitario mejorado.

Actualmente, el establecimiento Juan Muñoz para llevar a cabo su propio procedimiento de compostaje, utiliza orujo de uva agotado y escobajo como materiales base. Estos se mezclan con estiércol de vaca y de caballo, adquiridos en fincas cercanas, para conformar el sustrato a compostar.

La metodología empleada actualmente en la finca es el compostaje en pilas con volteo mecánico, un sistema de aireación que, si bien es eficaz, implica elevados costos operativos debido a la mano de obra requerida para su mantenimiento y al consumo de combustible y el mantenimiento asociado al uso de la retroexcavadora necesaria para realizar los volteos.

Considerando la experiencia previa del establecimiento Juan Muñoz en la elaboración de compost, se decidió mantener la técnica de compostaje en pilas como base metodológica para el análisis comparativo de distintos sistemas de aireación. El objetivo fue mantener esta técnica de compostaje y determinar cuál de las metodologías de aireación evaluadas presenta

una mejor relación entre costos operativos y calidad del producto final. En coherencia con esta elección, se respetaron las proporciones de mezcla actualmente utilizadas y establecidas por el ingeniero agrónomo responsable del proceso de compostaje en la finca.

Para cumplir los objetivos establecidos por esta tesis, a la hora de realizar el análisis económico y cualitativo del sustrato obtenido mediante los tres métodos de aireación seleccionados, se conformó una única pila de aproximadamente 15 m³ para cada metodología. La conformación de una sola pila por cada método de aireación respondió principalmente a limitaciones logísticas y operativas que condicionaron la posibilidad de generar réplicas de cada metodología de aireación.

En primer lugar, la cantidad de estiércol adquirida era limitada, por lo que debía administrarse cuidadosamente al momento de conformar las pilas de compostaje. Esto impedía subdividir el material en tres o cuatro pilas independientes sin comprometer los volúmenes mínimos necesarios para garantizar la estabilidad térmica y el adecuado desarrollo del proceso. Pilas de menor tamaño hubiesen dificultado alcanzar y sostener las temperaturas requeridas en la fase termofílica, afectando la representatividad del proceso y la calidad final del compost.

Además, el espacio físico destinado al ensayo y la disponibilidad de mano de obra y maquinaria destinada para el volteo fueron otros factores limitantes que impidieron trabajar con un mayor número de unidades experimentales. La operación simultánea de varias pilas pequeñas hubiese sobrepasado la capacidad operativa del sitio, comprometiendo la homogeneidad del manejo entre tratamientos.

Si bien contar con réplicas hubiera permitido realizar análisis estadísticos y obtener resultados más robustos, se optó por trabajar con pilas de tamaño operativo real, priorizando la representatividad del proceso industrial y la viabilidad técnica del ensayo en condiciones reales de campo. Esta decisión permitió evaluar el comportamiento de cada metodología de aireación en escalas compatibles con la práctica productiva, aunque implicó la limitación metodológica de no disponer de repeticiones experimentales.

3.1 Descripción del área de trabajo

La finca Juan Muñoz se encuentra ubicada en calle Bajo Las Cumbres s/n, distrito de Agrelo, departamento de Luján de Cuyo, provincia de Mendoza, Argentina. Está situada al sur del departamento, a aproximadamente 35 km de la ciudad de Mendoza y 10 km del centro de Luján de Cuyo. El acceso principal desde la ciudad de Mendoza, se realiza por la Ruta Provincial N° 7 continuando luego con rumbo sur, por calle Bajo Las Cumbres.



Figura 4: Representación cartográfica de los límites del establecimiento 'Juan Muñoz', con localización de sitios clave y recorridos vinculados al procedimiento de compostaje. Fuente: elaboración propia en QGIS sobre imágenes de Google Satellite, 2025

Antes de iniciar el procedimiento de compostaje, se realizó en primer lugar la selección del área destinada a la instalación de las pilas dentro de la finca. El lugar seleccionado, denominado playón de compostaje, cuenta con una superficie nivelada y con dimensiones adecuadas para permitir el correcto desempeño de las maniobras operativas con la retroexcavadora CASE 580 Super N, propiedad del establecimiento Juan Muñoz. En función de estos requisitos, se seleccionó un sector de 19 m de ancho por 27 m de largo (513 m²), ubicado en la zona central de la finca, con acceso directo tanto desde los callejones internos como desde la entrada principal.



Figura 5: Representación cartográfica del playón de compostaje, con localización de pilas, acequia y toma de agua. Fuente: elaboración propia en QGIS sobre imágenes de Google Satellite, 2025

3.2 Elección de los sistemas de aireación

En la presente tesis se evalúan tres metodologías de compostaje que se diferencian por el sistema de aireación implementado. La selección de estas tres alternativas se justifica en que constituyen tecnologías de bajo costo, accesibles para productores que no se dedican específicamente a la elaboración de compost, y que permiten aprovechar materiales disponibles en una finca o una bodega. El volumen de sustrato adoptado como referencia para la conformación de las tres pilas es de aproximadamente 15 m³ por pila, ya que representa una escala adecuada según consideración de los profesionales del establecimiento para realizar un análisis representativo del proceso de compostaje a nivel industrial.

Los diferentes métodos de aireación elegidos en las tres pilas son:

- **Aireación Pasiva Sin Volteo:** El funcionamiento de este sistema se basa en el principio de convección natural. Las pilas de compost se disponen sobre una estructura que permite la circulación de aire por su base, en este caso pallets de camión, y se instalan chimeneas a lo largo de su eje con el fin de mejorar la aireación en la zona central de la pila.

El aire contenido en el interior de las chimeneas se calienta como resultado de las reacciones exotérmicas producidas durante el proceso de compostaje. Este incremento de la temperatura del aire en el interior del tubo provoca una corriente ascendente en su interior, creando una presión negativa en su base, facilitando así el ingreso de aire fresco desde la parte inferior y lateral a través de los agujeros que contienen las chimeneas. Este mecanismo mejora la oxigenación interna de la pila y

permite prescindir de volteos mecánicos durante el proceso, manteniendo una adecuada aireación del sustrato (Sylla Y.B. et al, 2003).

Durante el armado de la pila, se instalan seis tubos de PVC (marca argentina Tigre, con un diámetro de 110 mm y un espesor de pared de 2,2 mm; uso comercial para desagüe pluvial), dispuestos verticalmente a una distancia de 1,5 metros entre sí, alineados a lo largo del eje central de la pila y colocados paralelamente respecto a su longitud.

Estos tubos, que funcionan como chimeneas de ventilación pasiva, son previamente perforados con orificios de 11 mm de diámetro, distribuidos cada 15 cm a lo largo de su superficie (Fernández López et al., 2017). Las perforaciones están dispuestas de manera enfrentada entre sí, siguiendo una orientación cruzada, lo que favorece una mejor captación y distribución del flujo de aire en el interior de la pila, optimizando así el proceso de oxigenación por convección y advección natural (Véase Figura 6).



Figura 6: Disposición cruzada de las perforaciones a lo largo del tubo de PVC. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025.

Los tubos, al ubicarse en el eje central de la pila, facilitan la disipación del calor y el suministro de oxígeno en la zona donde se alcanzan las temperaturas más elevadas (Jaramillo Henao et al., 2008). Estos tubos están abiertos en ambos extremos y se disponen de manera que su extremo inferior coincide con los espacios libres entre las tablas de los pallets. Gracias al efecto de convección generado por el aire caliente en el interior del tubo, se genera una disminución de la presión en la parte inferior del tubo, permitiendo la entrada adecuada de aire fresco.

Para este sistema de aireación se utilizan 20 pallets de 1 metro por 1,2 metros como base, sobre los cuales se dispone una cama de escobajo de aproximadamente 25 cm de altura. Esta cama de escobajo evita pérdidas de sustrato por gravedad entre las tablas de los pallets y mejora tanto el drenaje del agua de riego como el flujo de aire, disminuyendo el riesgo de condiciones anaeróbicas en la base de la pila (Román, 2013). Además, el uso de escobajo para esta tarea, permite reciclar un material que de otro modo es desecharo en la finca (Véase Figura 7).

El uso de pallets permite generar un tamaño óptimo de pila de 2,4 m de ancho (2 pallets uno a lado del otro), una altura de 1 m y una longitud de 10 m, ideal para el compostaje a la escala propuesta en la finca. Sobre esta base, compuesta por pallets y la cama de escobajo, se forma la pila de compost mediante el uso de una retroexcavadora.

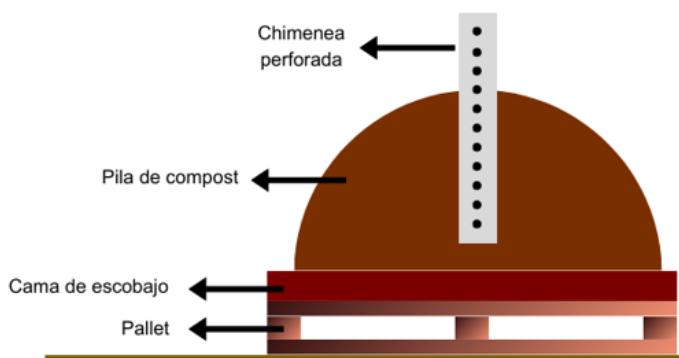


Figura 7: Representación de un plano transversal de la pila de aireación pasiva sin volteo.
Fuente: Elaboración propia

- **Aireación Natural Sin Volteo:** Para este método de aireación primeramente se forma una cama de escobajo de 25 cm la cual es colocada sobre suelo natural desnudo. Esta cama de escobajo tiene una dimensión de 10 m de longitud y 2,8 m de ancho y se utiliza para facilitar el drenaje del agua de riego y el flujo de aire en la base de la pila.

Con ayuda de la retroexcavadora, se forma la pila de compost directamente sobre la cama de escobajo. Las dimensiones de la pila formada son de 1,20 m de alto, 10 m de largo y 2,8 m de ancho (Véase Figura 8).

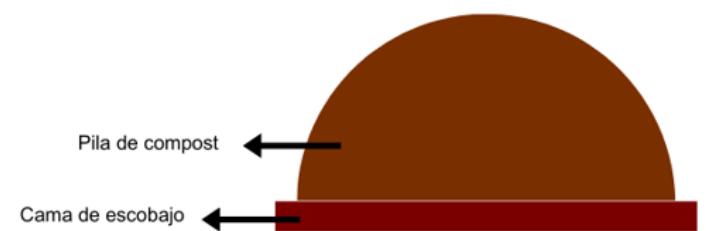


Figura 8: Representación de un plano transversal de la pila de aireación natural sin volteo.
Fuente: Elaboración propia

- **Aireación por Volteo con el Uso de Retroexcavadora:** La pila se conforma directamente sobre suelo natural desnudo (sin cama de escobajo de 25 cm) con ayuda de la retroexcavadora, que también se emplea para realizar volteos semanales del compost. Estas operaciones de volteo permiten mantener niveles óptimos de oxígeno y temperatura, fundamentales para el correcto desarrollo del procedimiento de compostaje. Las dimensiones de la pila formada son de 1,10 m de alto, 10 m de largo y 2,8 m de ancho (Véase Figura 9).

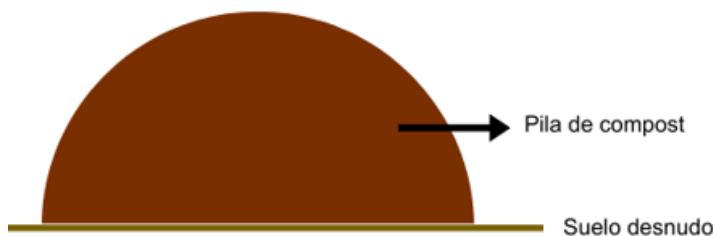


Figura 9: Representación de un plano transversal de la pila de aireación por volteo con el uso de retroexcavadora. Fuente: Elaboración propia

3.3 Tareas previas al armado de las pilas

Entre el 1 y el 15 de marzo de 2025, con ayuda de un camión utilizado por la finca para el traslado de materiales, se llevó a cabo el traslado del orujo de uva agotado y del escobajo desde la bodega hasta el playón de compostaje. Paralelamente, se transportaron desde fincas cercanas los aportes de estiércol vacuno y equino.

El 14 de marzo se efectuó el acondicionamiento de los caños destinados al sistema de aireación pasiva sin volteo. Al día siguiente, 15 de marzo, se comenzó con la mezcla inicial de los componentes del sustrato, conformando así una única pila denominada pila de sustrato homogeneizado. La conformación del volumen total de la pila de sustrato homogeneizado se realizó respetando las proporciones previamente definidas por la rutina empleada en la finca: por cada 2 paladas de orujo de uva agotado, se incorporó 1 palada de escobajo, 1 palada de estiércol de vaca y 0,5 palada de estiércol de caballo (Véase Figura 10).

La mezcla de sustratos debió interrumpirse el mismo 15 de marzo debido al agotamiento del estiércol de caballo disponible. La conformación de la pila de sustrato homogeneizado se retomó el día 22 de marzo, una vez recibida una nueva carga de estiércol de caballo, y fue completada esa misma jornada.



Figura 10: Pila de sustrato homogeneizado. Dicho sustrato fue utilizado para la posterior formación de las tres pilas de compost. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el noroeste.

3.4 Armado de las pilas de compostaje

El procedimiento de conformación de las pilas se documentó fotográficamente y su registro se encuentra representado en la sección Anexo I (Véase Figura 17.4 hasta 17.12).

El 22 de marzo de 2025 se dio inicio al armado de las 3 pilas, utilizando el material proveniente de la pila de sustrato homogeneizado. Para la etapa de formación de las pilas, se necesitó la participación de 4 operarios: uno encargado de operar la retroexcavadora, otro responsable del riego de la pila de sustrato homogenizado y dos más dedicados a colocar los pallets sobre el suelo, conformar la cama de escobajo correspondiente a los métodos de aireación natural y pasiva, y colaborar en la instalación de las chimeneas utilizadas en el sistema de aireación pasiva.

La pila de sustrato homogeneizado comenzó a regarse por un operario especialmente abocado a esta tarea (Véase Figura 17.4 en Anexo I). El riego inició a las 13:15 h, y se utilizó una manguera reforzada de 1 pulgada de diámetro interno, provista de un pico regador tipo lanza. De acuerdo con la metodología previamente implementada en la finca, esta etapa de riego se realiza antes de conformar las pilas de compostaje, con el fin de asegurar una distribución adecuada de humedad y de evitar procesos de anoxia dentro de las pilas ya conformadas.

El agua utilizada para humedecer la pila de sustrato homogeneizado y para todas las demás tareas de riego durante todo el procedimiento de compostaje, proviene de una cañería principal en la que se bombea agua para presurizar el sistema de riego por goteo de la finca. Es decir, que no se utiliza una bomba de agua exclusivamente para regar el compost. Se aprovecha la presión de la cañería de riego para extraer una parte del caudal de agua de la misma. Por consulta con los planos técnicos de diseño del sistema de riego, más las mediciones de caudal del equipo realizados por la propia empresa "Juan Muñoz S.A.", se tiene que la bomba que presuriza el sistema de riego entrega un caudal de agua igual a 52,82 m³/h con una desviación estándar de ± 3 m³/h.

Para determinar el caudal erogado por la manguera de riego con pico regador, utilizada en la humidificación del sustrato, se efectuó una medición volumétrica. Se registró el tiempo requerido para llenar un recipiente con capacidad de 20 litros, realizando tres repeticiones: antes de iniciar el riego, durante el mismo y al finalizar. El tiempo promedio obtenido fue de

54,66 s, lo que corresponde a un caudal de 0,366 L/s, equivalente a 21,95 L/min o 1,32 m³/h. Considerando que el caudal total de la bomba es de 52,82 m³/h, el aporte de la manguera de riego utilizada en las pilas de compost representa aproximadamente el 2,5 % del caudal total. Al finalizar el riego de la pila de sustrato homogeneizado, a las 17:40 h, se habían empleado 5.817 litros de agua.

Al mismo tiempo que se riega la pila del sustrato homogeneizado, el operador de la retroexcavadora preparó la superficie designada para el establecimiento de las pilas. Los 2 operarios restantes se encargan de presentar los 20 pallets correspondientes al sistema de aireación pasiva sobre el suelo (Véase Figura 17.5 en Anexo I).

Con ayuda de la retroexcavadora se trasladó el escobajo necesario para conformar la cama de escobajo correspondiente al método de aireación pasiva. Mientras se realizaba el transporte del material, dos operarios lo distribuían sobre los pallets para conformar la cama de escobajo (Véase Figura 17.6 y 17.7 en Anexo I). Finalizada esta tarea, se procedió a colocar el sustrato a compostar proveniente de la pila de sustrato homogeneizado, dando inicio a la conformación de la pila. Durante la disposición del sustrato sobre la cama de escobajo, un operario colaboró en la instalación de las chimeneas verticales empleadas en este sistema de aireación (Véase Figura 17.8 en Anexo I).

Una vez finalizada la conformación de la pila con sistema de aireación pasiva, se procedió a formar la pila correspondiente al método de aireación natural. La retroexcavadora trasladó el escobajo necesario, que fue distribuido con la colaboración de los operarios para conformar la cama de escobajo. Concluida esta etapa, se colocó sobre la cama de escobajo el sustrato proveniente de la pila homogeneizada, completando así la conformación de la pila (Véase Figura 17.10 y 17.11 en Anexo I).

En el método de aireación mediante volteo mecánico, el sustrato se colocó directamente sobre el suelo desnudo con ayuda de la retroexcavadora, sin requerir la intervención de operarios adicionales para su conformación (Véase Figura 17.12 en Anexo I). El tiempo de utilización de la retroexcavadora fue de 1 hora para el método de aireación pasiva, 30 minutos para el de aireación natural y 15 minutos para el de volteo mecánico.

Las pilas de compost fueron orientadas en sentido sur-norte, con el objetivo de minimizar la pérdida de humedad por evaporación. Esta disposición evita la exposición directa y prolongada de la superficie lateral de las pilas a la radiación solar incidente del norte, que ocurre durante las horas de mayor intensidad lumínica. Al reducir la superficie expuesta al sol durante el día, se favorece una menor evaporación del agua y permite conservar la humedad del sustrato y mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana.

El 22 de marzo, una vez finalizado el armado de las pilas, se midió la temperatura del sustrato a 60 cm de profundidad en cada una de las pilas, utilizando un termómetro digital Tzone BT05B, que funciona como data logger y está montado en una varilla de acero inoxidable. Esto permite registrar automáticamente la temperatura durante un período determinado por el operario, a una profundidad determinada por el operario dentro de la pila. Los datos registrados son transmitidos vía Bluetooth a una aplicación instalada en el celular del tesis, lo que permitió la lectura y registro manual de la información. Las temperaturas obtenidas fueron 42,1 °C en la pila con volteo, 40 °C en la pila con aireación pasiva y 44,3 °C en la pila con aireación natural.

3.5 Controles llevados a cabo durante el procedimiento de compostaje

Una vez finalizado el armado de las tres pilas de compost, se iniciaron los controles de temperatura y humedad, junto con el volteo de la pila correspondiente al método de aireación por volteo mecánico. Estas tareas se realizaron con frecuencia semanal desde el 27 de marzo hasta el 10 de junio de 2025.

3.5.1 Medición de la temperatura

Para la medición de la temperatura en las tres pilas se utilizó un termómetro digital Tzone BT05B, con el cual se registraron valores en cuatro puntos de muestreo distribuidos a lo largo del eje central de cada pila. Esta metodología permite obtener una evaluación más precisa de la distribución térmica interna del material, asegurando una caracterización representativa de la temperatura de la pila (Magrí, 2020).

El termómetro empleado posee una estructura metálica de acero inoxidable en forma de varilla (Véase Figura 11), graduada cada 10 cm, lo que permite registrar la temperatura en los distintos estratos de la pila. Dicha estructura se introduce verticalmente desde la parte superior de la pila, lo que facilita la medición de temperatura en tres profundidades distintas: 20 cm, 60 cm y 90 cm (Véase Figura 12).



Figura 11: Termómetro utilizado para la medición de temperatura. Fuente: Imagen propia

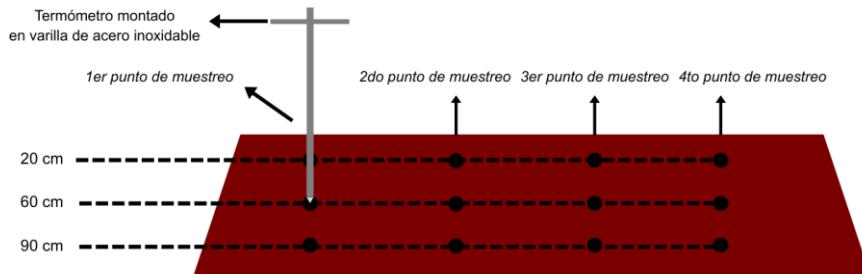


Figura 12: Representación gráfica de la metodología de toma de temperatura realizada en las 3 pilas de compost. Fuente: Propia

3.5.2 Medición de la humedad

Dado que los microorganismos constituyen la comunidad que cumple el rol principal en la degradación de la materia orgánica para generar un compost de buena calidad agrícola (Fariñas Camero, 1999), resulta fundamental mantener una humedad adecuada en el sustrato para favorecer una actividad microbiológica eficiente.

La humedad del compost se evaluó semanalmente mediante el método del puño, que consiste en tomar un puñado del material y comprimirlo con la mano: si se libera líquido, indica un exceso de humedad; si el material se desintegra al abrir la mano, refleja una falta de humedad; mientras que, si mantiene su forma sin liberar agua, se considera que la humedad es óptima. En este caso, la combinación de riegos semanales y precipitaciones ocurridas durante el procedimiento de compostaje permitió mantener una humedad adecuada durante todo el proceso de compostaje.

El riego de las pilas se realizó de forma semanal, a excepción de aquellas semanas en que las precipitaciones del lugar aportaron la humedad necesaria, haciendo innecesario el riego manual. Esta tarea fue realizada por un operario utilizando la misma manguera con pico regador empleada previamente para el riego de la pila de sustrato homogeneizado, aplicando riego durante 40 minutos por pila. En el caso de la pila con volteo mecánico, el riego se efectuó antes de los volteos para evitar la formación de zonas anóxicas (Véase Cuadro 3).

3.5.3 Volteo de las pilas

La pila con la metodología de aireación mediante volteo mecánico fue la única que presentó movimiento de su material constitutivo, mediante volteos semanales realizados con el objetivo de suministrar oxígeno al sustrato. Estas operaciones se efectuaron con una retroexcavadora entre el 28 de marzo y el 10 de junio de 2025, siendo este último el correspondiente a la última semana de control de temperatura. En aquellas semanas en que las lluvias provocaban el empantanamiento del terreno y dificultaban el uso adecuado de la retroexcavadora, los volteos no se realizaban o se reprogramaban para días con condiciones de suelo más favorables.

Se realizaron dos tipos de volteo. El primero, denominado volteo largo, consistía en levantar el material de la pila con la pala de la retroexcavadora desde uno de sus extremos y depositarlo de manera continua en un sector adyacente. El segundo tipo de volteo consistía en desplazar la pila desde su ubicación original aproximadamente tres metros hacia el oeste. La aplicación de estos dos métodos respondió a las limitaciones de espacio para maniobrar la máquina, ya que la presencia de una acequia impedía efectuar siempre el mismo tipo de volteo.

	Marzo				Abril				Mayo				Junio		
Número de Semana	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Seleccionar lugar															
Transporte Material															
Perforación Caños															
Mezcla Materiales															
Armando Pilas															
Riego de Pilas															
Medicion Temp. Y Humedad															
Toma de muestras															
Volteo Pila															

Cuadro 3. Diagrama de Gantt con las etapas del procedimiento de compostaje. Fuente: Elaboración propia.

3.6 Metodología de cálculo de los costos económicos

La evaluación económica consiste en recopilar y analizar los costos directos asociados a los tres procedimientos de compostaje, con el objetivo de determinar cuál método de aireación ofrece la mayor eficiencia económica.

Los costos directos se refieren a aquellos factores que pueden asociarse de manera clara, inequívoca y exclusiva a un objetivo dentro del proceso productivo. La materia prima se considera un costo directo (por ejemplo el estiércol comprado para conformar el sustrato), dado que forma parte física e indiscutible del producto final. De igual manera, también lo son la mano de obra empleada durante el proceso productivo y los insumos específicos como los pallets utilizados en el sistema de aireación pasiva (Balandá, 2005).

Como primer paso debemos elegir la unidad funcional (UF) del análisis, que es la cantidad de producto neto para la cual se realiza la evaluación. En este caso la UF establecida es una pila de compost con un volumen de 15 m³, realizado mediante alguno de los 3 métodos de aireación elegidos. A partir de este volumen, se determinan los costos directos asociados a cada metodología de aireación.

Para evaluar los costos económicos asociados a cada metodología de aireación, se delimitó el alcance del análisis al procedimiento específico de compostaje y a los distintos métodos de aireación implementados. En este sentido, se tuvieron en cuenta únicamente los costos generados desde la extracción de los residuos orgánicos provenientes de la bodega y el corral, hasta la obtención del compost final.

Los costos contemplados dentro de esos límites son los costos asociados a la adquisición y transporte de materiales, conformación de las pilas de compost y los costos operativos correspondientes al mantenimiento de cada sistema de aireación durante todo el procedimiento de compostaje. La integración de estos componentes permite determinar el costo total operativo para la producción de 15 m³ de compost en cada una de las metodologías de aireación analizadas.

Para evaluar los costos económicos asociados a cada metodología de compostaje, se sigue el siguiente procedimiento graficado en la Figura 13:

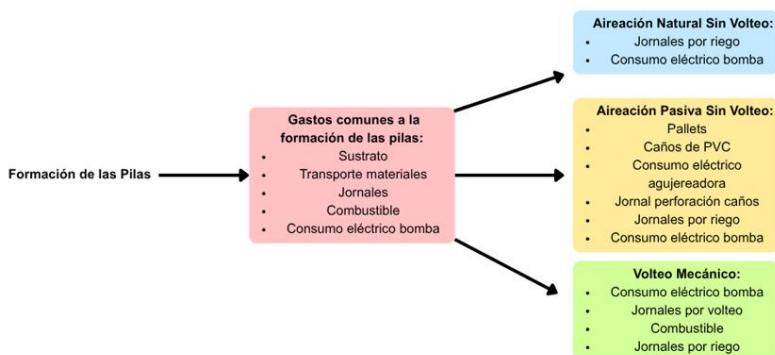


Figura 13: Diagrama de flujo que representa los gastos incurridos en las tres metodologías de aireación. Fuente: Propia

3.6.1 Gastos comunes a los 3 métodos de aireación

Los gastos comunes a los tres métodos de aireación corresponden a aquellos asociados a la compra de los estiércoles utilizados en la conformación del sustrato de las tres pilas de compostaje, el transporte del orujo agotado y del escobajo provenientes de la bodega, los jornales del personal involucrado en la formación de las pilas, el consumo de combustible destinado a la conformación y transporte del sustrato, y el consumo eléctrico de la bomba empleada para el riego durante todo el procedimiento de compostaje. Según el propietario del establecimiento Juan Muñoz, no es necesario considerar el costo del agua de riego en ninguna etapa del proceso de compostaje, ya que su bajo costo de adquisición no tendría un impacto significativo en los resultados finales del análisis.

Durante las etapas donde se tuvo que hacer uso de la retroexcavadora, se utilizó la aplicación de Android GPS Tracker para registrar las horas de uso de esta máquina. Esta aplicación se instaló en el celular del tesis y funciona mediante la recepción de señales satelitales que permiten determinar la ubicación del dispositivo móvil en tiempo real. La app registra parámetros como coordenadas, distancia recorrida, tiempo y velocidad (Véase Figura 14).

GPS Tracker permitió registrar el trayecto y el tiempo de operación de la retroexcavadora durante la conformación de la pila de sustrato homogeneizado, la formación de las pilas y los volteos realizados en uno de los sistemas de aireación seleccionados. Para ello, la aplicación se activa antes de iniciar la operación de la retroexcavadora y se entrega al maquinista, quien mantiene el celular con la aplicación en funcionamiento durante toda la operación de la máquina. A partir de ese momento, la aplicación registra de manera automática el tiempo de uso mediante un cronómetro y el recorrido efectuado mediante GPS. Esta herramienta se empleó con el propósito de establecer los costos económicos asociados a dichas etapas del proyecto.



Figura 14: Captura de pantalla de la aplicación GPS Tracker. Fuente: Propia

En todas las pilas se utilizó el mismo sustrato, compuesto por orujo de uva agotado (OUA), escobajo, estiércol vacuno y equino. Tanto el OUA como el escobajo, al tratarse de residuos

generados durante el proceso de vinificación realizado en la bodega ubicada dentro de la finca, no se les asigna un costo económico. No obstante, sí se considera el costo asociado a su transporte desde la bodega hasta el área de compostaje.

Según el ingeniero agrónomo encargado de la finca, el traslado del orujo agotado se realizó con la ayuda de un camión el cual transportó los materiales desde la bodega hasta el playón de compostaje, cubriendo un recorrido total de 1,7 km (ida y vuelta entre la bodega y el playón). Este camión realizó 4 viajes para transportar un volumen total de 45 m³ de orujo, necesarios para conformar las tres unidades funcionales evaluadas en el análisis. En el caso del escobajo, su transporte se realizó utilizando un tractor provisto de un carro, el cual efectuó 5 viajes desde la bodega hasta el playón de compostaje para transportar todo el escobajo.

En el transporte de orujo y escobajo se considera el gasto de combustible de los vehículos utilizados brindados por el propietario de la finca, pero no se incluyen los costos asociados al personal encargado del traslado de los materiales, debido a que son costos de muy baja magnitud en relación al costo total del proceso y, además, su estimación presenta un alto grado de variabilidad a la hora de tomar los datos de cada uno de los trabajadores implicados en esta tarea.

Según datos proporcionados por el propietario de la finca, el consumo de combustible del tractor y del camión es similar, dado que ambos se utilizan únicamente para el traslado de carga, sin realizar tareas de alta exigencia. Este tipo de operación genera un consumo estimado de 10 litros por hora. Un viaje completo (ida y vuelta hasta la bodega) toma aproximadamente 15 minutos, es decir, 0,25 horas (= 2,50 litros). Para los fletes internos, se realizaron 9 viajes, por lo que el consumo total estimado es:

$$2,50 \text{ litros} \times 9 \text{ viajes} = 22,50 \text{ litros}$$

En cuanto al traslado de pallets, se consideró un solo viaje de aproximadamente 5 minutos (0,083 horas), con un consumo de:

$$0,083 \text{ h} \times 1 \text{ viaje} \times 10 \text{ L/h} = 0,833 \text{ litros} \simeq 1 \text{ litro.}$$

Cabe aclarar que en el caso del traslado de pallets no se contabiliza el regreso al galpón de resguardo, ya que el tractor fue asignado a otras tareas inmediatamente después.

Los precios de los estiércoles fueron proporcionados directamente por el propietario de la finca durante el mes de junio de 2025. El estiércol equino, tiene un costo de \$25,00 por kilogramo, mientras que el estiércol vacuno tiene un valor de \$36,00 por kilogramo. Ambos precios incluyen el costo del flete. El cálculo del costo total se realiza estimando la cantidad de kilogramos incorporados en todas las pilas, en función de su proporción en la mezcla de la pila de sustrato homogeneizado. La densidad del estiércol de caballo se considera de 750 kg/m³ (Tellez Monzón et al., 2019) y la del estiércol vacuno, de 700 kg/m³ (Thirion F. et al., 1998).

Según las proporciones utilizadas en la formulación del sustrato de cada pila (0,11 para estiércol de caballo y 0,22 para estiércol vacuno), se estimó que para el volumen total de sustrato empleado para las 3 pilas se utilizan aproximadamente 3.669,58 kg de estiércol equino y 6.849,89 kg de estiércol vacuno.

Los gastos comunes a los tres métodos de aireación, correspondientes al consumo de combustible de la retroexcavadora y al jornal del operario que la conduce, se asignaron a las siguientes tareas: la mezcla del sustrato realizada el 15 de marzo de 2025 para formar la pila de sustrato homogeneizado, la continuación de esta actividad el 22 de marzo, y la formación

de las tres pilas de compost. Asimismo, también se contabilizaron el jornal de 8 horas correspondiente a cada uno de los tres operarios restantes que colaboraron en el armado de las pilas, efectuado el 22 de marzo.

El valor del jornal correspondiente al personal involucrado en todas las etapas del procedimiento de compostaje, es suministrado por el propietario de la finca como referencia para la estimación de los costos laborales.

El precio del combustible considerado en toda la evaluación económica es de \$1.310/L y corresponde al valor del gasoil común en el mes de junio de 2025. Esta elección se fundamenta en que dicho dato se encontraba disponible al momento de realizar el análisis y en que el propietario de la finca no cuenta con habilitación para el transporte de grandes volúmenes de combustible para uso particular, por lo cual abona el mismo precio que se ofrece al público en surtidor. El valor fue verificado mediante consulta directa en una estación de servicio de Mendoza.

El gasto de combustible asociado al uso de la retroexcavadora se estimó a partir del registro de distancia recorrida y horas efectivas de operación, obtenidas mediante la aplicación GPS Tracker. Según datos provistos por el propietario de la finca, la retroexcavadora CASE 580 Super N consume un tanque completo de 150 litros en aproximadamente 11 horas de trabajo, lo que equivale a un consumo promedio de 13,6 litros por hora.

El galpón de resguardo donde se almacena la retroexcavadora se encuentra a 1,1 km del playón de compostaje, por lo que cada viaje completo (ida y vuelta) implica un recorrido de 2,2 km. La determinación de las distancias recorridas resulta fundamental, ya que, combinada con la velocidad promedio registrada por la aplicación, permite estimar el tiempo efectivo de uso del equipo, dato clave para calcular con mayor precisión su gasto de combustible.

Durante la primera mezcla destinada a conformar la pila de sustrato homogeneizado, la retroexcavadora se utilizó durante 90 minutos, mientras que en la formación de las pilas su tiempo de uso fue de 266 minutos. Cabe destacar que en esos 266 minutos de uso, no se contabilizó el tiempo empleado en el armado de cada pila, ya que este se incluye dentro de los gastos atribuibles a cada método de aireación. En ambos casos se contempló el traslado de ida y vuelta entre el galpón de resguardo y el playón de compostaje. El gasto asociado a estas operaciones se calculó multiplicando las horas efectivas de uso por el consumo específico de la máquina (13,6 L/h) y por el precio del combustible considerado (\$1.310/L). A partir de esta metodología de cálculo, el costo económico de todas las actividades que involucran el uso de la retroexcavadora se calcula de la misma manera.

Para las actividades en las que se utilizó la retroexcavadora, tanto en la formación de las pilas como en su mantenimiento, se incorporó también el costo de amortización. Considerando los valores proporcionados por el propietario de la finca Juan Muñoz, este costo se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Amortización} = (\text{Costo de adquisición} - \text{Valor residual}) / \text{Vida Útil}$$

El resultado corresponde a la amortización anual, que, al convertirla a amortización por hora de uso, equivale a \$1.802,02 por cada hora de operación.

La bomba utilizada para el riego del sustrato de la pila homogeneizada es marca Ebara modelo MD/E 50-160/7.5. Según las especificaciones del fabricante, puede operar con un voltaje de 400 V o 690 V, y un amperaje de 13,7 A (a 400 V) o 7,9 A (a 690 V), dependiendo del tipo de conexión. La potencia nominal también varía según la conexión: 8,45 kW o 7,5 kW.

El 15 de marzo de 2025 se realizó un control del tablero eléctrico, registrándose un voltaje de 408 V y un amperaje de 13,1 A durante el funcionamiento de la bomba. Dado que estos valores son coherentes con su operación normal, se establecieron como valores de referencia para toda la evaluación económica.

Dado que el caudal erogado por la manguera utilizada para el riego del sustrato representa el 2,5 % del caudal brindado por la bomba, el consumo eléctrico asociado a su uso se estimó aplicando la misma proporción sobre el gasto energético de la bomba. Según Chapman, S. J. (2012), para sistemas trifásicos con conexión en Δ , la potencia eléctrica de la bomba se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos \phi$$

donde P representa la potencia en kW, V el voltaje de línea, I la corriente de línea y ϕ el factor de potencia de la bomba.

A partir de los valores de voltaje (408 V) y corriente (13,1 A) registrados en el tablero y el factor de potencia provisto por el manual de la bomba, se calcularon los kW de potencia consumida por la bomba mediante la siguiente fórmula:

$$(\sqrt{3} * 408 V * 13,1 A * 0,91)/1000 = 8,42 \text{ kW}$$

Dado que en cada riego con manguera se utiliza únicamente el 2,5 % del caudal total erogado por la bomba, a este valor de potencia se lo multiplicó por 0,025 (equivalente al 2,5 %). El resultado obtenido sirve para determinar la potencia utilizada en cada riego.

$$8,42 \text{ kW} * 0,025 = 0,211 \text{ kW}$$

Luego del armado de las pilas, cada pila recibió un total de 7 riegos. En cada ocasión en que se realizaba un riego también se efectuaba un volteo en la pila con sistema de aireación de volteo mecánico. En conjunto, la manguera de riego se utilizó durante 17 horas durante todo el procedimiento de compostaje. De esas 17 horas de uso, durante el armado inicial de las pilas, el sustrato fue humedecido durante 4,5 horas. Posteriormente, en cada pila, se aplicó un riego semanal de 40 minutos y un solo riego, efectuado en la segunda semana, con una duración de 10 minutos. Al estimar el tiempo de riego correspondiente a cada pila, se determinó que cada una fue regada durante 4,16 horas a lo largo del procedimiento de compostaje.

A partir del valor de potencia previamente calculado, este se multiplicó por las horas de uso de la manguera, estimando así el consumo eléctrico correspondiente exclusivamente al riego del sustrato, expresado en kWh.

Consumo eléctrico por el uso de la manguera durante el riego de la pila de sustrato homogeneizado:

$$0,211 \text{ kW} * 4,42 \text{ horas} = 0,93 \text{ kWh}$$

Consumo eléctrico total del riego de cada pila:

$$0,211 \text{ kW} * 4,16 \text{ horas} = 0,81 \text{ kWh}$$

Para determinar el consumo eléctrico total de la bomba, se suma el consumo registrado durante la formación de las pilas y el correspondiente al riego de las tres pilas. De este modo,

el valor de gasto eléctrico calculado por pila se multiplica por tres, obteniéndose el consumo total asociado a los tres métodos de aireación.

$$0,93 \text{ kWh} + (0,81 \text{ kWh} * 3) = 3,36 \text{ kWh}$$

Para establecer el costo del kilovatio-hora abonado por la finca, se tomó como referencia una factura de la empresa proveedora de electricidad correspondiente a mayo de 2025, provista por el propietario. La finca cuenta con una tarifa diferencial según la franja horaria de consumo, donde el período de 23:00 a 14:00 h se considera en la franja de bajo consumo. Debido a que las tareas de armado y riego de las pilas se llevaron a cabo en horario matutino, este tramo horario fue el utilizado para determinar el valor del kilovatio-hora, equivalente a \$79/kWh.

En el cuadro 4 de la sección 4.2 se resumen los costos asociados a los gastos comunes atribuidos a los 3 métodos de aireación.



Figura 15: Especificaciones de la bomba y tablero de control de la misma. Fuente: Imagen propia

3.6.2 Gastos atribuidos al método de aireación natural

En el caso de la pila que utiliza el método de aireación natural (sin volteo), se consideraron el gasto de combustible y la amortización durante su formación. Para el mantenimiento de la pila a lo largo del procedimiento de compostaje, se tuvo en cuenta el costo de la electricidad consumida por la bomba durante el riego semanal, así como el jornal del trabajador encargado del riego manual. Cabe destacar que el jornal considerado para el riego de cada pila corresponde a 5 horas de trabajo a lo largo de todo el procedimiento de compostaje (Véase Cuadro 5 de la sección 4.2).

3.6.3 Gastos atribuidos al método de aireación pasiva

Para el método de aireación pasiva (sin volteo), se consideran los costos de los caños de PVC y los pallets utilizados en la estructura de la pila. Se emplearon tres tubos de PVC de 110 mm de diámetro exterior x 2,2 mm de espesor de paredes, los cuales fueron cortados y perforados en forma de cruz, obteniéndose cuatro tubos de 248 cm y dos de 217 cm.

Estas tareas fueron realizadas por un operario, empleado de la finca, y para poder estimar el gasto económico asociado se consideró un jornal de 8 horas. Además, se contempló el consumo eléctrico de la agujereadora utilizada durante el proceso. Si bien la finca otorga estos materiales sin un costo comercial directo, en la evaluación económica se les asignó un valor

de referencia con el objetivo de reflejar su costo de reposición y permitir una comparación equitativa entre tratamientos.

El precio de los pallets fue proporcionado por el propietario de la finca, mientras que el valor de los caños de PVC se obtuvo mediante un relevamiento de precios realizado en comercios locales.

Asimismo, se consideran el gasto de combustible y la amortización durante su formación y los gastos de mano de obra y consumo eléctrico asociados a las perforaciones en los caños, calculados en función del consumo de la agujereadora utilizada y el tiempo de uso. Además, se incluye el costo de la electricidad consumida por la bomba durante los riegos semanales, y el jornal del trabajador encargado de realizar el riego manual (Véase Cuadro 6 de la sección 4.2).

3.6.4 Gastos atribuidos al método con volteo mecánico

En el caso de la pila manejada con volteo mecánico, se incorporan los costos correspondientes al jornal del operario encargado de conducir la retroexcavadora y al consumo de combustible necesario para su funcionamiento. Debido a la presencia de obstáculos en el playón de compostaje, como es la acequia ubicada a 3 metros de la pila que dificulta la maniobrabilidad del equipo, durante el proceso se ejecutaron dos tipos de volteo: uno con un recorrido total de 2,51 km y otro más corto de 2,23 km.

Durante el proceso de compostaje se realizaron un total de 11 volteos con retroexcavadora. De estos, 6 corresponden a volteos largos que tienen una duración aproximada de 35 minutos cada uno. Los restantes 5 volteos fueron cortos de una duración aproximada de 22 minutos. El tiempo de operación considerado para cada volteo incluye el traslado de la retroexcavadora desde el galpón de resguardo hasta el playón de compostaje, la ejecución de la maniobra de volteo, y el retorno al galpón al finalizar la tarea.

La suma total de los minutos donde se utiliza la retroexcavadora para los volteos largos es de 210 minutos, es decir 3,5 horas. En el caso de los volteos cortos se utiliza la retroexcavadora por 110 minutos, es decir 1,83 horas. El tiempo total de uso de la retroexcavadora para operaciones de volteo durante todo el procedimiento de compostaje es de:

$$3,5 \text{ horas} + 1,83 \text{ horas} = 5,33 \text{ horas}$$

Además, se considera el costo de la electricidad consumida por la bomba durante los riegos semanales, junto con el jornal del trabajador responsable de realizar el riego manual de la pila (Véase Cuadro 7 de la sección 4.2).

3.6.5 Alquiler de maquinaria

Dado que no todos los productores interesados en implementar su propio procedimiento de compostaje cuentan con el mismo contexto socioeconómico ni con la posibilidad de disponer de una retroexcavadora para la formación y el volteo mecánico de las pilas, resulta relevante tener en cuenta los costos de alquiler de una máquina con características similares a la utilizada en el presente análisis.

Conocer el costo de alquiler de una retroexcavadora permite evitar el cálculo individual de aspectos como la amortización de la máquina, el consumo de combustible, el mantenimiento y las horas de trabajo del operario, ya que todos estos factores se encuentran contemplados en la tarifa de alquiler por hora. Según el valor actualizado al 22 de agosto de 2025,

proporcionado por un proveedor local, el costo de alquiler de una retroexcavadora de características y marca similares asciende a \$70.000 por hora.

A partir de este valor, se lo emplea para estimar los costos totales asociados a la formación y al volteo de las pilas, sin considerar de manera independiente los gastos de combustible, amortización ni las horas de trabajo del operario, ya que estos ya se encuentran contemplados en la tarifa de alquiler.

Considerando los gastos atribuidos específicamente a cada método de aireación, se elaboraron cuatro tablas en las que se detallan los costos generados, incluyendo el alquiler de la retroexcavadora (véase Cuadros 8, 9, 10 y 11 de la sección 4.2).

3.7 Evaluación de calidad del compost

La calidad de un compost se define principalmente por el grado de estabilidad y madurez de la materia orgánica resultante del procedimiento de compostaje. Según Moreno Casco et al. (2008), la estabilidad biológica del compost se entiende como el nivel de descomposición de la materia orgánica, que puede medirse evaluando la actividad biológica en la pila de compost. La actividad biológica puede evaluarse mediante medidas respirométricas o a través de la liberación de calor generada por la actividad microbiana (Iannotti, 1993, en Moreno Casco et al., 2008). Por su parte, la madurez del compost se refiere a la ausencia de fitotoxicidad en el producto final.

La calidad del compost comienza a definirse desde la selección de los materiales iniciales y las proporciones en que se combinan, la metodología de aireación empleada, la frecuencia y el volumen de riegos y volteos, además de la decisión sobre el momento de dar por finalizado el proceso (Campitelli, 2010). Teniendo en cuenta lo anterior, los materiales empleados en el procedimiento de compostaje del presente análisis se seleccionaron por la simple razón de su generación en el proceso industrial vinícola, pero también por los buenos resultados obtenidos previamente en la finca al compostarlos y utilizarlos como enmiendas.

Además de los parámetros de estabilidad y madurez, la calidad del compost también se evalúa a través de la determinación de metales pesados y patógenos. Sin embargo, en la práctica los productores solo consideran estos aspectos principalmente como criterios de admisibilidad, especialmente cuando se emplean materiales con riesgo de contener metales pesados o patógenos que puedan afectar la salud humana y vegetal. En este sentido, cuando los valores obtenidos superan los límites críticos establecidos, el compost debe ser excluido como enmienda (Campitelli 2010).

Sin embargo, debido a la disponibilidad de tiempo limitado y los costos económicos que implican, este tipo de determinaciones no suelen realizarse con frecuencia por los productores de compost a baja escala. En el procedimiento de compostaje realizado en la finca no se llevaron a cabo análisis de metales potencialmente tóxicos ni de patógenos que determinan completamente la madurez del producto final; no obstante, se recomienda incorporarlos en las evaluaciones de las próximas temporadas.

Para un productor de compost que utiliza este procedimiento para eliminar y darle nueva utilidad a los subproductos de su cadena de producción principal, resulta fundamental contar con una metodología económica y confiable que permita asegurar la estabilidad y madurez del compost obtenido. Si bien, en un escenario ideal, se busca obtener un producto de alto valor agrobiológico, libre de sustancias fitotóxicas y suficientemente humificado para incrementar significativamente el contenido de materia orgánica estabilizada y supuestamente

con una contribución de vida microbiana significativa en los cultivos, en la práctica el proceso de compostaje suele interrumpirse según el uso que se le dará al compost, la rapidez con que será empleado y el espacio disponible para su elaboración (Rynk, 1992).

En el presente estudio, por cuestiones logísticas propias del manejo de la finca como la asignación de maquinaria para realizar otras labores, las bajas temperaturas que provocan el congelamiento del agua dentro de las tuberías con riesgo de rotura, y la necesidad de utilizar el personal de la finca para la realización de otras tareas como poda y fertilización en los cuarteles, el procedimiento de compostaje se dio por finalizado 96 días después de su inicio.

Esto significa para la realidad en el manejo de una finca: el procedimiento y el tiempo disponible para el compostaje, primordialmente deben ajustarse a la lógica y logística del proceso productivo de la empresa; suponiendo que esta condición no influya en la calidad del producto final del compost.

3.7.1 Medición de la temperatura

La forma más sencilla de determinar la estabilidad biológica del compost es mediante el seguimiento de la temperatura en la pila. Una disminución sostenida de los valores de temperatura constituye la señal más confiable de que la actividad microbólica ha cesado (Rynk, 1992). Este control de temperatura se llevó a cabo entre el 27 de marzo y el 10 de junio de 2025, siguiendo la metodología de medición descripta en la sección 3.5.1 y los resultados obtenidos se presentan en la sección 4.3.

3.7.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos obtenidos de las mediciones de temperatura se realizó con el asesoramiento de la profesora María Eugenia Martínez, integrante de la Cátedra de Estadística de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo.

Con los datos obtenidos en la toma de temperaturas realizadas durante todo el procedimiento de compostaje, un análisis estadístico permite sustentar con evidencia estadística si el tipo de aireación empleado y a la semana evaluada generan efectos en la temperatura de las pilas. Esta información es esencial para emitir recomendaciones fundamentadas sobre qué sistema de aireación adoptar, según los objetivos propuestos por el productor a la hora de establecer un sistema de compostaje.

Para este análisis se aplicó un análisis de varianza (ANOVA o ADEVA). Al analizar la variable temperatura en los distintos tratamientos de compostaje, se consideró la profundidad como bloque y a la metodología y la semana como factores.

El modelo estadístico utilizado se expresa como:

$$\text{Temperatura promedio} = \mu \text{ (media)} + \phi_i \text{ (profundidad)} + \alpha_j \text{ (metodología de aireación)} + \beta_k \text{ (semana)} + (\alpha * \beta)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

donde la temperatura está determinada por la temperatura promedio, la media general, los efectos de cada profundidad evaluada, cada metodología de aireación y cada una de las semanas de compostaje, así como por la interacción entre las distintas metodologías y las diferentes semanas (tiempo), más un término de error que recoge la variabilidad no explicada o atribuida al azar. El análisis estadístico de los datos obtenidos y sus resultados se presentan en la sección 4.4.

3.7.3 Metodología de extracción de muestras para análisis de laboratorio

Con el fin de determinar empíricamente la evolución del proceso de compostaje y la calidad final del material producido, se extrajeron muestras tanto durante el desarrollo del procedimiento como al momento de su finalización. Las muestras fueron enviadas a la Cátedra de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, donde se realizó un análisis de abono orgánico. En dicho estudio se determinaron los siguientes parámetros: humedad, cenizas, materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, potasio, relación C/N, conductividad eléctrica y pH. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 13 (véase sección 4.5).

Debido a la duración del procedimiento de compostaje, determinada por la lógica y logística de trabajo en la misma finca, la toma de muestras para análisis de laboratorio se realizó en tres momentos a lo largo del procedimiento. La primera instancia tiene lugar el 22 de marzo, durante el armado de las pilas de compost. La segunda toma de muestras se realizó 31 días después, el 22 de abril, coincidiendo con el final de la etapa termófila en las pilas con volteo mecánico y aireación pasiva. La tercera y última toma tuvo lugar el día del desarmado de las pilas, el 10 de junio, es decir, 89 días después del inicio del procedimiento de compostaje.

Para la primera instancia de muestreo, se aplicó el método del cuarteo mediante la extracción de tres submuestras representativas de cada pila de compostaje. Estas submuestras fueron posteriormente homogeneizadas para conformar una muestra compuesta única por pila (Magrí, 2020).

Transcurridos 31 días desde el inicio del proceso de compostaje, se tomaron nuevas muestras utilizando el mismo procedimiento. En esta ocasión, se extrajo material de cuatro puntos distintos de cada pila, a una profundidad de 30 centímetros. Las muestras obtenidas fueron mezcladas para conformar una única muestra representativa por cada método de aireación evaluado.

Al finalizar el procedimiento de compostaje, se procede a mezclar el material constituyente de cada pila con el objetivo de obtener muestras representativas de toda su composición. En las pilas con métodos de aireación estática esta mezcla permite integrar zonas con distintos grados de descomposición, especialmente en la parte superior, donde el material presenta una menor degradación. En el caso de las pilas con aireación pasiva y natural, se evita incorporar el escobajo acumulado en la cama de escobajo, ya que no forma parte activa del proceso de descomposición.

A partir de esta mezcla, se extraen cuatro submuestras por pila, las cuales fueron homogeneizadas para conformar una muestra única representativa de cada tratamiento de aireación. Los resultados obtenidos de estos análisis de laboratorio se encuentran resumidos en el Cuadro 13 de la sección 4.5.

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la evaluación de los costos directos asociados a las tres metodologías de compostaje, el análisis de los parámetros físico-químicos utilizados para determinar la calidad del material obtenido y su clasificación según la Resolución Conjunta 1/2019, así como el análisis estadístico realizado a partir de los datos de temperatura registrados en los tratamientos evaluados. El propósito es dar respuesta a los objetivos planteados en la tesis, orientados a identificar cuál es el método de aireación más eficiente para el compostaje de residuos orgánicos provenientes del establecimiento Juan Muñoz S.A., considerando de manera conjunta la calidad del producto final y su viabilidad económica.

4.1 Finalización del procedimiento de compostaje

El día 10 de junio, se dio por finalizado el procedimiento de compostaje para los 3 sistemas de aireación. Para desarmar las pilas, se procedió a abrirlas a lo largo de su eje central con la ayuda de la retroexcavadora, lo que permitió visualizar su perfil interno (Véase Figura 17.15 en Anexo I). Este corte mostró que, en los sistemas de pilas estáticas, el sustrato mantenía una mayor heterogeneidad en toda la composición de la pila, mientras que la zona central presentaba compactación y una coloración blanquecina (véanse Figuras 17.20 y 17.21 en el Anexo I). La presencia de esta zona compacta fue más marcada en la pila con aireación natural que en la pila con aireación pasiva.

La coloración blanquecina en las zonas internas compactadas de las pilas estáticas, donde la aireación es limitada pero no completamente ausente, puede atribuirse al desarrollo de hongos filamentosos y actinomicetos. Aunque estos organismos necesitan oxígeno para crecer, hay pruebas suficientes que sugieren que los hongos termófilos no detienen su crecimiento en entornos de oxígeno reducido y, de hecho, pueden sobrevivir bien en condiciones anóxicas (Ingersoll, 2023), lo que les permite colonizar ambientes donde otras poblaciones microbianas han disminuido (Véase Figura 17.18 en Anexo I).

En la evidencia visual del material según las diferentes metodologías de aireación, en la pila con el sistema de volteo mecánico se visualizó un material final mucho más homogéneo que en los métodos estáticos (Véase Figura 17.16 en Anexo I). En estas metodologías de aireación estáticas, pudo notarse a simple vista que la descomposición del material en la parte superior de las pilas estaba mucho menos avanzada que en el centro.

Durante todo el procedimiento de compostaje se observó una marcada reducción en el tamaño de las pilas, especialmente en la sometida a volteo mecánico. Según Román (2015), el volumen de una pila puede disminuir hasta un 50 %, debido tanto a la compactación como a la pérdida de carbono en forma de CO₂. Lo planteado por Moreno Casco (2008) permite interpretar que la mayor reducción de volumen en la pila con volteo mecánico se debe a que esta técnica produce una descomposición microbiana más eficiente, respecto a los otros métodos de aireación evaluados.

4.2 Resumen de costos

En esta sección se presentan cuadros que sintetizan los costos calculados según la metodología descripta en la sección 3.6.

En el siguiente cuadro (Cuadro 4) se resumen los gastos comunes atribuidos a los 3 métodos de aireación:

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Primera mezcla 15/3/25	Trabajo	5.000	\$/hora	2	hora	10.000	\$
	Sustrato (estiércol vaca)	36	\$/kilo con flete	3.669,58	kg	132.105	\$
	Sustrato (estiércol caballo)	25	\$/kilo con flete	6.849,89	kg	171.247	\$
	Amortización	1.802,02	\$/hora	1,5	hora	2.703,03	\$
	Combustible	1.310	\$/litro	13,6	L/h	26.724	\$
Formación Pilas 22/3/25	Trabajo	5.000	\$/hora	32	hora	160.000	\$
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,931	kWh	73,54	\$
	Combustible (Flete materiales)	1.310	\$/litro	10	L/h	40.610	\$
	Amortización	1.802,02	\$/hora	2,68	hora	4.835,43	\$
	Combustible (Retroexcavadora)	1.310	\$/litro	13,6	L/h	47.806,27	\$
TOTAL GASTO COMUNES A LOS 3 MÉTODOS DE AIREACIÓN						\$ 596.104,49	

Cuadro 4: Gastos comunes a los 3 métodos de aireación. Fuente: Propia.

El resumen de los gastos asociados al método de aireación natural se presentan en el Cuadro 5:

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Insumos y Mantenimiento	Trabajo	5.000	\$/hora	5,5	hora	27.500	\$
	Electricidad (bomba)	0,211	kWh	4,16	hora	0,88	kW/hora
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,88	kWh	69,21	\$
	Amortización	1.802,02	\$/hora	0,5	hora	901,01	\$
	Combustible formación	1.310	\$/litro	13,6	L/h	8.908,00	\$
TOTAL GASTOS ATRIBUIDOS AL MÉTODO DE AIREACIÓN NATURAL						\$ 37.378,23	

Cuadro 5: Gastos atribuidos al método de aireación natural. Fuente: Propia

El resumen de los gastos asociados al método de aireación pasiva se presentan en el Cuadro 6:

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Insumos y Mantenimiento	Trabajo Perforación	3.000	\$/hora	8	hora	24.000	\$
	Agujereadora	79	\$/kWh	0.4	kWh	252,80	\$
	Caño PVC (110 x 2,2)	15.500	\$	3	unidades	46.500	\$
	Pallet	7.500	\$	20	unidades	150.000	\$
	Trabajo (Riego)	5.000	\$/hora	5	hora	25.000	\$
	Electricidad (bomba)	0,211	kW	4,16	hora	0,88	kWh/hora
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,88	kWh	69,21	\$
	Amortización	1.802,02	\$/hora	1	hora	1.802,02	\$
	Combustible formación	1.310	\$/litro	13,6	L/h	17.816	\$
TOTAL GASTOS ATRIBUIDOS AL MÉTODO DE AIREACIÓN PASIVA						\$ 260.440,04	

Cuadro 6: Gastos atribuidos al método de aireación pasiva. Fuente: Propia.

El resumen de los gastos asociados al método de volteo mecánico se presentan en el Cuadro 7:

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Insumos y Mantenimiento	Trabajo (Riego y Maquinista)	5.000	\$/hora	10	hora	50000	\$
	Electricidad (gasto bomba)	0,211	kW	4,16	hora	0.88	kWh
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,88	kWh	69.21	\$
	Combustible	1.310	\$/litro	13,6	L/h	94.959,28	\$
	Amortización (formación y mantenimiento de pila)	1.802,02	\$/hora	5,58	hora	10.055,28	\$
	Combustible formación	1.310	\$/litro	13,6	L/h	4454.00	\$
TOTAL GASTOS ATRIBUIDOS AL MÉTODO DE VOLTEO MECÁNICO						\$ 160.787,78	

Cuadro 7: Gastos atribuidos al método de volteo mecánico. Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta el costo de alquiler de la retroexcavadora para la conformación de las pilas y para el volteo en el tratamiento con aireación mecánica, se obtienen los siguientes costos directos asociados:

Los costos directos correspondientes a los gastos comunes a los tres métodos de aireación, donde se incluye la mezcla del material y la formación de las pilas, considerando el alquiler de la maquinaria, se resumen en el Cuadro 8:

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Primera mezcla 15/3/25	Sustrato (estiércol vaca)	36	\$/kilo con flete	3.669,58	kg	132.105	\$
	Sustrato (estiércol caballo)	25	\$/kilo con flete	6.849,89	kg	171.247	\$
	Alquiler máquina	70.000	\$/hora	2	hora	140.000	\$
Formación Pilas 22/3/25	Trabajo	5.000	\$/hora	24	hora	120.000	\$
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,931	kWh	73,54	\$
	Combustible (Flete materiales)	1.310	\$/litro	10	L/h	40.610	\$
	Alquiler máquina	70.000	\$/hora	2,68	hora	187.600	\$
TOTAL GASTO COMUNES A LOS 3 MÉTODOS DE AIREACIÓN						\$ 791.635,54	

Cuadro 8: Gastos comunes a los 3 métodos de aireación considerando el alquiler de la retroexcavadora. Fuente: Propia. En Resultados

El resumen de los gastos asociados al método de aireación natural teniendo en cuenta el alquiler de maquinaria se presentan en el Cuadro 9.

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Insumos y Mantenimiento	Trabajo	5.000	\$/hora	5	hora	25.000	\$
	Electricidad (bomba)	0,211	kWh	4,16	hora	0,88	kW/hora
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,88	kWh	69,21	\$
	Alquiler máquina	70.000	\$/hora	0,5	hora	35.000	\$
TOTAL GASTOS ATRIBUIDOS AL MÉTODO DE AIREACIÓN NATURAL						\$ 60.069,21	

Cuadro 9: Gastos atribuidos al método de aireación natural considerando el alquiler de la retroexcavadora. Fuente: Propia. En Resultados

El resumen de los gastos asociados al método de aireación pasiva teniendo en cuenta el alquiler de maquinaria se presentan en el Cuadro 10.

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Insumos y Mantenimiento	Trabajo Perforación	3.000	\$/hora	8	hora	24.000	\$
	Agujereadora	79	\$/kWh	0,4	kWh	252,80	\$
	Caño PVC (110 x 2,2)	15.500	\$	3	unidades	46.500	\$
	Pallet	7.500	\$	20	unidades	150.000	\$
	Trabajo (Riego)	5.000	\$/hora	5	hora	25.000	\$
	Electricidad (bomba)	0,211	kW	4,16	hora	0,88	kW/hora
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,88	kWh	69,21	\$
	Alquiler máquina	70.000	\$/hora	1	hora	70.000	\$
TOTAL GASTOS ATRIBUIDOS AL MÉTODO DE AIREACIÓN PASIVA						\$ 315.822,01	

Cuadro 10: Gastos atribuidos al método de aireación natural considerando el alquiler de la retroexcavadora. Fuente: Propia. En Resultados

El resumen de los gastos asociados al método de volteo mecánico natural teniendo en cuenta el alquiler de maquinaria se presentan en el Cuadro 11.

	Factores	Precio Unitario	Unidad	Consumo	Unidad	Importe	Unidad
Insumos y Mantenimiento	Trabajo (Riego)	5.000	\$/hora	5	hora	25.000	\$/hora
	Electricidad (gasto bomba)	0,211	kW	4,16	hora	0,88	kWh
	Electricidad (efectivo)	79	\$/kWh	0,88	kWh	69,21	\$
	Alquiler máquina	70.000	\$/hora	5,58	hora	390.600	\$
TOTAL GASTOS ATRIBUIDOS AL MÉTODO DE VOLTEO MECÁNICO						\$ 415.669,21	

Cuadro 11: Gastos atribuidos al método de volteo mecánico considerando el alquiler de la retroexcavadora. Fuente: Propia.

4.2.1 Análisis de costos

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados y permitir comparaciones en un contexto más amplio, además de expresar los costos en pesos argentinos, se decidió presentar los valores también en dólares estadounidenses. Para ello se consideró la cotización oficial promedio del período analizado (marzo – junio de 2025), equivalente a \$1.220,52 por dólar. De esta manera, se busca atenuar el efecto de la variación cambiaria y brindar una referencia más estable que permita contrastar los costos de los distintos métodos de compostaje en un marco económico comparativo (Véase Cuadro 12).

Comentado [GS3]: en Material y Método

	Importe sin en cuenta alquiler de retroexcavadora		Importe teniendo en cuenta alquiler de retroexcavadora	
Gastos comunes a los 3 métodos	\$ 596.104,49	US\$ 488,40	\$ 791.635,54	US\$ 648,61
Gastos Aireación Natural	\$ 37.378,23	US\$ 30,62	\$ 60.069,21	US\$ 49,22
Gastos Aireación Pasiva	\$ 260.440,04	US\$ 213,38	\$ 315.822,01	US\$ 258,76
Gastos Volteo Mecánico	\$ 160.787,78	US\$ 131,74	\$ 415.669,21	US\$ 340,57

Cuadro 12: Resumen de gastos de los diferentes métodos de aireación evaluados, con y sin alquiler de retroexcavadora, expresados en AR\$ y US\$. Fuente: Propia

La comparación de costos sin tener en cuenta el alquiler de la retroexcavadora utilizada para la formación y volteo de las pilas, muestra que la aireación natural resulta ser la alternativa más económica (\$37.378,23), debido al poco uso de insumos y al tener un mantenimiento bastante sencillo. Aunque es la metodología de aireación más accesible económicamente, debe evaluarse si alcanza niveles aceptables de madurez del compost.

La metodología de aireación pasiva, en cambio, representa el mayor gasto (\$260.440,04), debido mayormente a los costos asociados a la infraestructura requerida (tuberías y pallets). El volteo mecánico presenta un costo intermedio (\$160.787,78), aunque tiene un costo mucho más bajo que la aireación pasiva, es claramente superior a la aireación natural debido al uso de maquinaria y los jornales extra por el operador del equipo.

Además, para determinar los costos totales al procedimiento de compostaje debe considerarse el gasto de \$596.104,49 atribuido a los gastos comunes por la mezcla del sustrato y la formación de las pilas.

Al incorporar el costo de alquiler de la retroexcavadora, se observa un cambio significativo en el escenario económico, ya que tanto en la formación de las pilas como en las tres metodologías de aireación se incrementan de manera considerable sus costos.

En relación con los métodos de aireación, el volteo mecánico se posiciona como el más costoso (\$415.669,21), debido a la gran cantidad de horas de uso de la máquina requeridas para realizar los volteos semanales. En contraste, los métodos estáticos resultan más económicos al demandar un menor número de horas máquina: la aireación pasiva ocupa el segundo lugar con un costo de \$315.822,01, mientras que la aireación natural mantiene su posición como la alternativa más barata, con un gasto de \$60.069,21. Finalmente, los gastos comunes a las tres metodologías también se ven afectados, aumentando de \$596.104,49 a \$791.635,54.

4.3 Resultados medición temperatura

Durante el análisis de datos realizado a partir de las mediciones de temperatura, se observó que las 3 pilas de compost partieron desde una temperatura cercana a las temperaturas correspondientes a la de una etapa termófila. Esta etapa termófila duró aproximadamente 7 semanas en la pila con volteo y con aireación pasiva. Respecto a la pila de aireación natural, en los 89 días en que se realizó el procedimiento de compostaje nunca se llegó a una temperatura promedio que pudiera establecer que la pila se reencontraba en una fase mesófila (como segunda etapa) y durante todo el procedimiento mantuvo temperaturas promedios mayores respecto a las otras dos pilas.

Este comportamiento puede explicarse, según Moreno Casco et al. (2008) entre otros factores, por la influencia de la resistencia del material al flujo de aire en la pérdida de calor del sistema: a mayor resistencia, menor será la liberación de gases calientes hacia el exterior de la pila, lo que favorece la retención de calor. Por ello, en las pilas donde el aire puede fluir de manera más constante y liberadamente, como en la pila con aireación pasiva, o donde se realizan volteos que permiten la evacuación de gases calientes, lleva menos tiempo alcanzar la etapa mesófila que en un método con aireación natural.

La duración del proceso de compostaje influye directamente en el nivel de estabilidad y madurez del producto final, y por lo tanto en su calidad, independientemente del material de origen o de la técnica empleada. En este estudio, se estima que ninguno de los tres métodos de aireación alcanzó la estabilidad biológica requerida en el lapso de 89 días. Considerando que un material orgánico que no cumple con los criterios de estabilidad y madurez se clasifica como compost inestable (Aparna et al., 2008; Cofie et al., 2009, citado en Campitelli, 2010), se concluye que las 3 metodologías de aireación evaluadas generaron un compost inestable. No obstante, los sistemas de aireación que mantuvieron un suministro de oxígeno más constante se aproximan en mayor medida a los criterios de estabilidad establecidos por Moreno Casco et al. (2008).

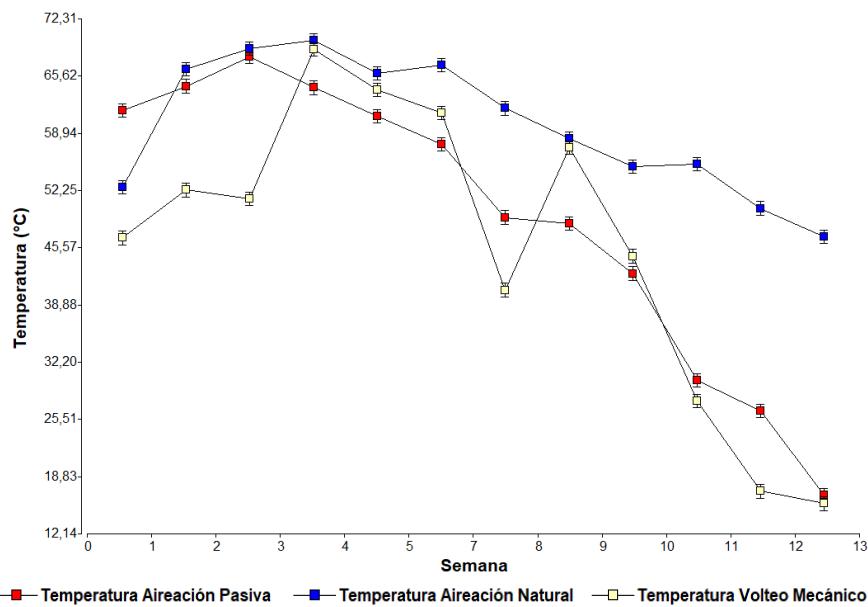


Figura 16: Gráfico de puntos que muestra la temperatura (°C) de las pilas de compost en función del tiempo transcurrido (semanas). Para cada tratamiento, se representan las curvas a distintas profundidades, utilizando el modelo estadístico: $\text{Temperatura promedio} = \mu (\text{media}) + \varphi (\text{prof.}) + \alpha (\text{método de aireación}) + \beta (\text{semana}) + (\alpha * \beta) + \varepsilon$. Fuente: elaboración propia, captura de pantalla del software InfoStat.

4.4 Resultados estadísticos

Durante las primeras seis semanas, los tres métodos se comportaron de manera similar, manteniendo temperaturas termofílicas sin diferencias estadísticas relevantes. A partir de la semana 7 comenzaron a observarse diferencias significativas, destacándose que el método de volteo y de aireación pasiva redujeron su temperatura más rápidamente en comparación con el método de aireación natural. A partir de la novena semana de compostaje y hasta el final del procedimiento de compostaje, las diferencias en la temperatura se acentuaron, y la metodología de aireación natural conservó temperaturas más elevadas respecto a los otros tratamientos, que comenzaron a descender hasta valores cercanos a la temperatura ambiente.

Al finalizar la medición de temperatura en la semana 12, se observó que el método de aireación natural permaneció en etapa termófila, mientras que los sistemas de aireación pasiva y volteo mecánico habían ingresado en etapa mesófila. Incluso antes del análisis estadístico, resulta evidente que la dinámica térmica difiere según la metodología de aireación aplicada, lo que repercute en el grado de estabilización de la materia orgánica.

La formulación y el análisis estadístico se realizaron con el software InfoStat, arrojando los siguientes resultados (Véase Figura 17):

Variable	N	R ^a	R ^b	Aj	CV
Temperatura	432	0,89	0,88	10,74	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	102444,99	35	2927,00	95,54	<0,0001
Metodo aireacion	15788,57	2	7894,28	257,69	<0,0001
Semana	71834,95	11	6530,45	213,17	<0,0001
Metodo aireacion*Semana	14821,47	22	673,70	21,99	<0,0001
Error	12131,57	396	30,64		
Total	114576,56	431			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,53107

Error: 30,6353 gl: 396

Metodo aireacion Medias n E.E.

Natural	59,84	144	0,46	A
Chimenea	49,17	144	0,46	B
Volteo	45,61	144	0,46	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=4,27361
 Error: 30,6353 gl: 396
 Semana Medias n E.E.

	4	5	3	6	2	8	1	7	9	10	11	12
	67,61	63,63	62,66	61,95	61,05	54,65	53,67	50,53	47,39	37,69	31,27	26,38
	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
	A	B	B	B	B	C	C	C D	D	E	F	G

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=8,69771
 Error: 30,6353 gl: 396
 Método aireacion Semana Medias n E.E.

	4	3	4	3	5	2	5	2	4	5	6	7	1	6	5	8	9	10	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
	69,79	68,87	68,78	67,84	66,90	66,42	65,94	64,43	64,27	64,01	61,62	61,30	60,93	58,30	57,65	57,26	55,32	55,03	52,67	52,31	51,28	50,17	49,12	48,40	46,83	44,58	42,55	40,63	30,08	27,68	26,51	17,13	16,64	15,67	
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	
	A	B	B	B	B	C	C	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	C D	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura 17: Resultado del análisis ADEVA obtenido mediante el software InfoStat. Fuente: Captura de pantalla del propio software.

De acuerdo a los datos obtenidos, la temperatura promedio se ve afectada por interacción entre las distintas metodologías de aireación y el tiempo evaluado, con un p-valor menor a 0,0001 (alpha=0,05). De estas combinaciones, las mayores temperaturas promedio de manera diferencial, se observa en el compostaje natural en la cuarta semana del proceso, y las que tuvieron menores temperaturas promedio diferentes al resto fueron: la metodología de volteo en la semana 11 y volteo y chimenea en la semana 12.

Los resultados del análisis de la varianza también indican que los factores método de aireación y semana obtuvieron un p-valor menor a 0,0001 (alpha=0,05), por lo tanto, permite concluir que ambos ejercen efectos individuales significativos sobre la temperatura interna de la pila.

El análisis estadístico (prueba de Tukey, p<0,05) mostró que la temperatura de los procedimientos de compostaje presentó diferencias significativas entre semanas y tratamientos. Aquellas semanas que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticas entre sí, mientras que las que presentan letras distintas evidencian diferencias significativas. A partir de este resultado, se puede identificar en qué períodos cada metodología de compostaje presentó variaciones estadísticamente significativas en la temperatura promedio, lo que permite comparar el comportamiento térmico de los tratamientos a lo largo del proceso.

Estos resultados no son confiables, ya que no se cumplieron los supuestos básicos del ANOVA, ya que según el test de Shapiro-Wilk los datos de temperatura no provienen de una distribución normal. Asimismo, se observó falta de independencia y ausencia de homogeneidad de varianzas, atribuibles a la correlación temporal de los errores, debido que al tomarse las temperaturas sobre la misma unidad de compost en el tiempo, se puede sospechar que no existe independencia al estar los datos correlacionados en el tiempo (medidas longitudinales en el tiempo).

Debido a que se cumple la normalidad de los errores, la falta de heterocedasticidad y/o la correlación espacial puede corregirse mediante el análisis de un modelo lineal mixto. Este modelo permite trabajar la correlación temporal mediante la matriz de varianzas y covarianzas del tipo de simetría compuesta o corAR1 o corCAR1. En consecuencia, el análisis estadístico más adecuado para este tipo de información es un modelo lineal mixto, dado que permite incorporar la correlación entre observaciones repetidas y realizar comparaciones más robustas entre metodologías y semanas. No obstante, considerando que un análisis estadístico más exhaustivo se aparta del eje central de la presente tesis, se sugiere que en investigaciones futuras se emplee este tipo de modelos para corregir la falta de independencia en los datos (West et al., 2015).

4.5 Resultados análisis laboratorio

	<u>Inicial</u>	<u>Pasiva</u>	<u>Volteo</u>	<u>Natural</u>	<u>Días de compostaje</u>
Humedad, %	55.98	58.73 49.97	46.84 42.27	62.08 53,17	31 días 89 días
		26.53 42.21	25.56 50,94	42.67 34.27	31 días 89 días
Cenizas, %	28.24	73.46 57.78	74.43 49,05	57.33 65.72	31 días 89 días
		42.59 33.5	43.17 28,44	33.25 38.11	31 días 89 días
Materia org, %	71.76	1.86 1.26	1.65 1,33	1.87 0.92	31 días 89 días
		0.38 0.58	0.39 0,50	0.63 0.38	31 días 89 días
Carbono org, %	41.62	2.49 2.21	2.18 2,39	33.25 1.98	31 días 89 días
		22.83 26.6	26.08 21.32	17.76 41.51	31 días 89 días
Nitrógeno (N), %	1.59	1.86 1.26	1.65 1,33	1.87 0.92	31 días 89 días
		0.38 0.58	0.39 0,50	0.63 0.38	31 días 89 días
Fosforo (P), %	0.43	2.49 2.21	2.18 2,39	3.14 1.98	31 días 89 días
		22.83 26.6	26.08 21.32	17.76 41.51	31 días 89 días
Potasio (K), %	1.7	1.86 1.26	1.65 1,33	1.87 0.92	31 días 89 días
		0.38 0.58	0.39 0,50	0.63 0.38	31 días 89 días
Relación C:N	26.03	2.49 2.21	2.18 2,39	3.14 1.98	31 días 89 días
		22.83 26.6	26.08 21.32	17.76 41.51	31 días 89 días

Conductividad eléctrica (microS/cm)	4230	6450	2970	4560	31 días
		4170	3470	3480	89 días
pH	5.82	6.15	8.09	8.31	31 días
		7.93	7.98	7.46	89 días

Cuadro 13: Resumen de los parámetros medidos mediante análisis de laboratorio. Fuente: Propia

El análisis comparativo de los diferentes parámetros medidos en el análisis de abono orgánico realizado en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, se tienen en cuenta los resultados en base seca, con el fin de mantener condiciones homogéneas entre los tres tratamientos.

El contenido de cenizas se determina mediante la combustión de las muestras en horno, midiendo el porcentaje de sólidos que permanece. La diferencia de las cenizas que quedan respecto al 100 % de la muestra analizada, corresponde al porcentaje de materia orgánica de la muestra.

A los 89 días, los contenidos de cenizas fueron 42,21 % (chimenea), 50,94 % (volteo) y 34,27 % (aireación natural). El mayor porcentaje en el tratamiento con volteo es esperable por la mayor mineralización elementos como nitrógeno y fósforo (Farías Camero, 1999), y la posible incorporación de partículas minerales durante el manejo mecánico, mientras que el menor valor en aireación natural indica que hay una mayor fracción orgánica remanente, debido a la baja tasa de descomposición de la materia orgánica que tiene esta metodología de aireación.

Según Román et al. (2015), un compost maduro debe presentar un contenido de materia orgánica en base seca superior al 20 %. Los análisis de laboratorio muestran que el sustrato inicial tenía un 71,76 % de materia orgánica, valor que disminuyó a lo largo del procedimiento de compostaje debido a la degradación de la fracción orgánica (Insam & Bertoldi, 2007, en Pisi, 2017). Según los resultados de laboratorio obtenidos en las muestras extraídas a los 89 días de compostaje, las tres metodologías de aireación evaluadas alcanzaron valores compatibles con los criterios de madurez propuestos por Román et al. (2015).

Los análisis de laboratorio de las muestras finales evidencian la mayor eficiencia de los organismos aeróbicos en la descomposición de la materia orgánica. A los 89 días de compostaje, los métodos de aireación estáticos mostraron una menor degradación de la materia orgánica en comparación con el volteo mecánico. El método de aireación natural presentó el valor más alto de materia orgánica remanente (65,72 %), seguido por la aireación pasiva (57,78 %), mientras que el volteo mecánico alcanzó un 49,05 %. Estos resultados evidencian que la metodología que asegura un mayor suministro de oxígeno a la comunidad microbiana favorece y optimiza la degradación de la materia orgánica.

Los contenidos de nutrientes observados a los 89 días se encuentran resumidos en la siguiente tabla (Véase Cuadro 14):

	Valores para compost maduro	Pasiva 89 días	Volteo 89 días	Natural 89 días
N	0,5 – 2%	1,26	1,33	0,92
P	< 1%	0,58	0,50	0,38
K	< 0,5 – 1,5%	2,21	2,39	1,98

Cuadro 14: Comparación de los valores de N, P y K obtenidos con los parámetros establecidos por Agricultural Compost Factsheets (2025). Fuente: Agricultural Compost Factsheets

La mayoría de los valores obtenidos a partir de los análisis de laboratorio de las muestras, 89 días después del inicio del procedimiento, se encuentran dentro de los rangos establecidos para un compost maduro proveniente de residuos agrícolas, según lo publicado por Agricultural Compost Factsheets (2025).

El tratamiento con volteo exhibe los niveles más elevados de N y K, lo que sugiere mayor mineralización y disponibilidad inmediata de nutrientes; el sistema con aireación pasiva presenta la mayor concentración de P; mientras que la aireación natural conserva menor contenido de nutrientes, lo que indica menor avance en la mineralización de nutrientes y por lo tanto menor estabilidad biológica.

Según Cegarra, citado en Farías Camero (1999), el valor ideal de la relación C/N al inicio de cualquier proceso de compostaje debe situarse entre 25 y 30. En las muestras obtenidas durante el armado de las pilas, se determinó un valor inicial de 26,03, lo que indica que la proporción es adecuada para iniciar el procedimiento de forma eficiente y que, probablemente, el producto final alcanzará una buena calidad agronómica.

Los resultados de los análisis de laboratorio realizados en las muestras tomadas durante la fase inicial, al final de la etapa termofílica y al concluir el proceso de compostaje evidencian que la metodología de aireación por volteo mostró la mejor evolución en su relación C:N, (de 26,08 a 21,32). Respecto a las dos metodologías de aireación restantes, se visualiza un comportamiento inusual en la relación C:N. Este patrón, aunque se desvía de lo esperado en condiciones ideales, donde la relación C:N tiende a disminuir progresivamente debido a la mineralización del carbono, puede explicarse por la metodología de muestreo aplicada al finalizar el procedimiento de compostaje.

Al dar por finalizado el procedimiento de compostaje, en cada pila se realizó una mezcla integral del material constituyente. Antes de realizar esta mezcla, en los métodos de aireación estática, se observó una mayor heterogeneidad estructural del material (Véase Figura 17.19 en Anexo I), ya que las capas superficiales no estuvieron expuestas de manera constante a las mismas condiciones meteorológicas de temperatura y humedad que el material cercano al núcleo de la pila. Como resultado, estas zonas presentaron una descomposición incipiente y aún contenían fracciones ricas en carbono estructural. La homogeneización final del contenido de la pila incorporó estos materiales menos descompuestos en la muestra analizada, lo que podría explicar el incremento de la relación C:N en los métodos de aireación estáticos al concluir el proceso de compostaje.

El pH de las muestras finales de las tres metodologías de aireación se mantiene dentro de un rango aceptable de 6,5 a 8,5, según Roman et al. (2015). Por su parte, la conductividad eléctrica, de acuerdo con la normativa nacional (Resolución Conjunta 1/19) sobre compostaje de residuos agrícolas, indica que los valores registrados para las tres metodologías se encuentran dentro de los establecidos para el uso agrícola.

En las metodologías de aireación estáticas, los elevados valores de la relación C:N observados en el producto final deben ser cuidadosamente considerados antes de su aplicación al suelo. Una alta relación C:N puede generar inmovilización del nitrógeno disponible, lo que afectaría negativamente la nutrición de las plantas (Moreno Casco, 2008).

Esto ocurre porque, ante una abundancia de carbono y escasez relativa de nitrógeno, los microorganismos se multiplican para degradar la materia orgánica, utilizando el nitrógeno disponible en el entorno para sintetizar su biomasa. Como consecuencia, ese nitrógeno queda temporalmente retenido dentro de las células microbianas, volviéndose inaccesible para las plantas hasta que los microorganismos mueren y el nitrógeno es liberado nuevamente al sistema.

Por lo tanto, para implementar un procedimiento de compostaje estático de corta duración, resulta indispensable realizar un análisis de laboratorio final que permita determinar la dosis adecuada de compost a aplicar por hectárea y evitar problemas de inmovilización de nitrógeno. Como alternativa, en procedimientos de compostaje donde se tiene en cuenta que se obtendrá un producto con una elevada relación C:N, esta puede mejorarse mediante la incorporación de suplementos nitrogenados, por ejemplo, urea al final del procedimiento o bien mezclando el producto final con compost más estabilizado que presente una menor relación C:N.

4.6 Comparación con parámetros de la Resolución Conjunta 1/19

En el Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost, Resolución Conjunta 1/19, se establecen los criterios de calidad y las posibles aplicaciones del compost elaborado a partir de residuos orgánicos separados en origen y recolectados de manera diferenciada. En la presente tesis, dichos parámetros se toman como referencia para clasificar el compost producido mediante distintos métodos de aireación en las categorías A o B, según lo definido en la normativa, garantizando así su aptitud para diversos usos.

De acuerdo con los valores obtenidos en las muestras finales de laboratorio para las tres metodologías de aireación, los parámetros de calidad indican que el material generado en las tres pilas puede clasificarse como compost Clase B. Sin embargo, el método con volteo mecánico mostró valores más cercanos a los criterios establecidos por la Resolución Conjunta 1/19 para ser considerado como un compost Clase A (Véase Cuadro 15).

Parámetros	Compost Clase A	Compost Clase B	Muestra 89 días Aireación Pasiva	Muestra 89 días Volteo Mecánico	Muestra 89 días Aireación Natural
pH	5 - 8,5		7,93	7,98	7,46
Olores	No debe presentar olores desagradables		No presentó olores desagradables		
Humedad (%)	< 60%		49,97	42,27	53,17
Conductividad Eléctrica (µS/cm)	< 4000	< 6000	4170	3470	3480
Relación C:N (%)	≤ 20	≤ 30	26,6	21,32	41,51
Materia Orgánica (%)	≥ 20		57,78	49,05	65,72

Cuadro 15. Comparación de los valores de parámetros obtenidos en laboratorio con los especificados por la Resolución 1/19. Fuente: Resolución Conjunta 1/19.

5. Discusión

Teniendo en cuenta los costos directos asociados a los sistemas de aireación evaluados, se esperaba que la metodología de volteo mecánico presente costos más elevados; sin embargo, según lo expuesto en el Cuadro 12, cuando el productor cuenta con maquinaria propia, estos costos resultan inferiores a los del sistema de aireación pasiva diseñado para este estudio. En cambio, si el productor debe alquilar la retroexcavadora, los costos aumentan significativamente, posicionando al sistema de volteo mecánico como la alternativa más costosa debido al alto valor del alquiler del equipo.

Por el contrario, se concluye que la metodología de aireación natural es claramente el método más económico, con costos casi cinco veces menores que la aireación mecánica y más de siete veces más bajos que la aireación pasiva. Este bajo costo se explica por la ausencia de insumos y el escaso requerimiento de energía y mano de obra; sin embargo, repercute de manera significativa en la calidad del compost obtenido.

El método de aireación pasiva, si bien resulta más eficiente en la generación de condiciones favorables para el proceso de compostaje, requiere una infraestructura específica (como caños y pallets) que incrementa significativamente los costos. En particular, el uso de pallets que aunque encuentran en desuso, es necesario tener en cuenta su eventual reposición por unidades nuevas, lo que debe ser considerado dentro del análisis económico.

Respecto a la calidad del material obtenido, partiendo de un sustrato adecuado, es posible obtener compost de buena calidad con cualquiera de los métodos de aireación evaluados, siendo el tiempo de degradación de la materia orgánica el principal factor diferenciador. Esta degradación está principalmente determinada por la actividad de los microorganismos aeróbicos que conforman la comunidad biológica de la pila (Fariñas Camero, 1999). En consecuencia, mantener un suministro adecuado de oxígeno resulta indispensable para asegurar una descomposición eficiente de la materia orgánica en un rango de tiempo aceptable para la empresa.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron identificar diferencias claras en el desempeño de los tres sistemas de aireación evaluados. El método de volteo mecánico fue el único que alcanzó, en un período de 89 días, valores físico-químicos y un aspecto final similares con los de un compost estable y maduro. El análisis de laboratorio confirmó un mayor grado de degradación de la materia orgánica y valores próximos a los establecidos para un compost Clase A según la Resolución 1/19, respaldados por la adecuada aireación proporcionada por los volteos.

La aireación pasiva, si bien es un método estático, mostró un comportamiento intermedio entre el volteo mecánico y la aireación natural. Las pilas equipadas con chimeneas registraron mayores niveles de oxigenación, lo que favoreció una descomposición más rápida y resultados más favorables en el mismo período respecto al método de aireación natural. No obstante, el compost obtenido aún presentó heterogeneidad y no alcanzó completamente los valores de calidad logrados por el volteo mecánico, por lo que se estima que requeriría un período mayor a 89 días para producir un material homogéneo y clasificado como Clase A.

En contraste, la aireación natural resultó ser la alternativa de menor costo inmediato, pero también la menos eficiente en términos de transformación de la materia orgánica. A los 89 días se observaron fragmentos del sustrato con su forma original y valores de laboratorio que evidenciaron un menor grado de estabilización. Esto indica que este método solo es recomendable cuando se dispone de un horizonte temporal amplio, por ejemplo, ciclos de compostaje de un año.

Desde el punto de vista económico, el volteo mecánico y la aireación pasiva representan los métodos con mejores resultados en calidad final, pero también los más costosos. En el caso del volteo mecánico, su costo depende críticamente de la disponibilidad de maquinaria: si el productor debe alquilarla, los costos se incrementan significativamente posicionando a este método como el más caro. Por su parte, la aireación pasiva requiere una inversión inicial mayor que la aireación natural, especialmente por la necesidad de materiales como PVC o pallets, aunque dichos insumos son reutilizables y pueden amortizarse en ciclos sucesivos. Además, es posible reducir costos mediante el uso de subproductos disponibles en la finca, como como un colchón de escobajo más alto que favorezca la aireación, sin la necesidad de utilizar pallets.

En síntesis:

- El volteo mecánico produjo el compost de mayor calidad en el menor tiempo. Sin embargo, su aplicación a escala industrial implica costos muy elevados si no se dispone de la maquinaria adecuada.
- La aireación natural constituye una alternativa factible sólo cuando se cuenta con un margen de tiempo prolongado para la utilización del compost. Si bien es un método de bajo costo, requiere que el procedimiento total de compostaje dure al menos un año, lo que demanda una cuidadosa planificación.
- La aireación pasiva puede alcanzar resultados similares al volteo mecánico, aunque en plazos más extensos. Sus costos de inversión inicial pueden ser elevados pero pueden reducirse mediante el reuso de los caños PVC en los compostajes siguientes y el uso de materiales de mayor vida útil, en desuso o sin valor comercial para el productor.

Considerando estos resultados, la selección del método de aireación más adecuado por parte del productor dependerá de la disponibilidad de recursos, la infraestructura disponible, el uso

que se le quiera dar al compost y del horizonte temporal previsto para el proceso de compostaje en sí y para la utilización del compost.

A futuro, sería valioso complementar esta investigación con evaluaciones sobre la calidad biológica del compost, incluyendo actividad microbiana, estabilidad y madurez, así como su desempeño en campo como enmienda orgánica. Esto permitiría fortalecer las recomendaciones técnicas y su aplicación práctica en distintas escalas productivas.

7. Bibliografía

Ansorena, J., Batalla, E., Merino, D. (2014). *Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos*. Escuela Agraria de Fraisoro, Zizurkil.

Antunes, L. P.; Martins, L. F.; Pereira, R. V.; Thomas, A. M.; Barbosa, D.; Lemos, L. N. y Setubal, J. C. (2016). *Microbial community structure and dynamics in thermophilic composting viewed through metagenomics and metatranscriptomics*. Scientific Reports, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/srep38915>

Balandia, T. A. (2005). *Contabilidad de costos, 1ra ed.* Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones. Departamento de contabilidad. Facultad de Ciencias Económicas. Universidad Nacional de Misiones.

BC Ministry of Agriculture and Food (2025). *Agricultural Compost Factsheets. Factsheet #4: Using Agricultural Compost as a Fertilizer and Soil Amendment*

Bernal, M.P., Alburquerque, J.A., Moral, R. (2009). *Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review*. Bioresource Technology, Vol. 100, 5444–5453.

Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., Cabrera Capitán, F. (2008). *Factores que afectan al proceso de Compostaje*. (93-109). Reina Mercedes, Sevilla.

Buscaglia, M., Rodriguez, M. (2002). *Evaluación y proyecto de compostaje*. [Tesis de Grado en Ingeniería Industrial.]. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Plata.

Campitelli, P.A. (2010). *Calidad de compost y vermicompuestos para su uso como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas*. Tesis para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.

Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. España: Díaz de Santos. Fundación Universitaria Iberoamericana

Cegarra, J., Alburquerque, J.A., Gonzalvez, J., Tortosa, G., Chaw, D. (2006). *Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ('alperujo') managed by mechanical turning*. Waste Management, 26, 1377–1383.

Columela, L. J. M. (2004). *De re rustica* (Libros I–XII). Editorial Gredos. (Obra original publicada en el Siglo I d.C.).

Congreso de la Nación. (2002). *Ley 25.675: Ley General del Ambiente*. Boletín Oficial de la República Argentina.

Congreso de la Nación. (2004). *Ley 25.916: Gestión Integral de Residuos Domiciliarios*. Boletín Oficial de la República Argentina.

Constitución Nacional (1994). *Artículo 41*. Gobierno de la Nación Argentina

Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas*. 5^a ed. McGraw-Hill.

Epstein, E. (2011). *Industrial Composting*. Environmental Engineering and Facilities Management. CRC Press. Boca Raton, Florida. Estados Unidos de América.

FAO. (2017). *Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa, Metodología WISDOM*. Provincia de Mendoza. Colección Documentos Técnicos N° 4. Buenos Aires.

Farías Camero, M., Ballesteros, M.I., Bendeck, M. (1999). *Variación de parámetros físicoquímicos durante un proceso de compostaje*. Revista Colombiana de Química, Volumen 28.

Fernández, C., Baroni, A., Ríos Vera, M., Cantaloube, M., Manjón, J., Bonamaison, C., Marianetti, A. (2019). *Matriz Productiva para Mendoza*. Instituto de Desarrollo Rural. Mendoza, Argentina.

Fernandez López, S., Serrato Cuevas, R., Castelán Ortega, O. y Aviles Nova, F. (2017). *Comparacion entre dos métodos de ventilación en la composición química de compost de estiércoles pecuarios*. Centro Universitario Temascaltepec. Universidad Autónoma del Estado de México.

Huang, G.F., Wong, J.W.C., Wu, Q.T., Nagar, B.B. (2004). *Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust*. Waste Management, 24, 805-813.

Ingwersoll, J.G. (2023). *Thermophilic Fungi as the Microbial Agents of Choice for the Industrial Co-Fermentation of Wood Wastes and Nitrogen-Rich Organic Wastes to Bio-Methane*. Microorganisms 2023, 11, 2600. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102600>

Lavado, R.S. (2012). *Origen del compost, proceso de compostaje y potencialidad de uso*. Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso. UNRN- Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, Argentina.

Llaver Luca, S. A. (2021). *Planificación de la construcción y operación de una planta de escala industrial de compostaje con residuos orgánicos provenientes de la agroindustria en la provincia de Mendoza-Argentina*. [Tesis de Grado en Ingeniería En Recursos Naturales Renovables.] Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo.

Jaramillo Henao, G., Zapata Marquez, L. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. [Monografía para optar al título de Especialistas en Gestión Ambiental]. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

Magri, L. (2020). *Manejo de los residuos de cama profunda en un sistema de producción porcina mediante el compostaje*. [Tesis para optar al título de Magíster en Manejo y Conservación de los Recursos Naturales.] Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario.

Morales Vera, R. (2023). *Compostaje de residuos vitivinícolas. Avanzando hacia una industria circular*. Centro de Biotecnología de los Recursos Naturales (CENBIO), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Católica del Maule. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20235601034>

Moreno Casco, J., Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Ogunwande, G.A., Osunade, J.A. (2011). *Passive aeration composting of chicken litter: effects of aeration pipe orientation and perforation size on losses of compost elements*. Journal of environmental management.

Pasqualotto, N. (2022). *Caracterización y aprovechamiento de residuos orgánicos de bodega: compostaje y obtención de enmienda para uso agrícola*. [Tesis de Grado en Ingeniería En Recursos Naturales Renovables.] Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo.

Peñafiel Rodriguez, L. S. (2010). *Evaluación de alternativa de compostaje de los residuos sólidos orgánicos generados en la cabecera municipal de Mocoa, mediante las tecnologías Biostart, Bioterre Sisvita y Microorganismos Eficientes*. Instituto Tecnológico del Putumayo. Ciecyt Mocoa, Putumayo.

Pisi, G. (2017). *Compostaje del orujo de uva agotado y uso del compost obtenido como componente de sustrato para plantines florales*. [Trabajo para optar al título de Magister Floricultura]. INTA Mendoza.

Rivero, A. F. (2014). *Caracterización Físico-Química de compost obtenido a partir de residuos orgánicos alimenticios y de poda de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”*. [Tesis de Grado en Ingeniería En Recursos Naturales Renovables.] Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo.

Roman, P., Martinez, M., Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. FAO. Pp 28, 30, 54, 59.

Ros Muñoz, M. (2012-2014). *Guía para la obtención de compost a partir de residuos y subproductos de la industria agroalimentaria. Proyecto Life + AGROWASTE*. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS), Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Murcia, España.

Rynk, R. (1992). *On-Farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service.

Sánchez Monedero, M.; Roig, A.; Paredes, C.; Bernal, M.; 2001. *Nitrogen transformation during organic waste composting by the rutgers system and its effects on pH, C.E and maturity of the composting mixtures*. Bioresource Technology.

Secretaría de Ambiente y Ordenamiento Territorial (2017). *Proyecto gestión integral de residuos sólidos urbanos zona metropolitana de la Provincia de Mendoza*. Pp 22.

SCyMA y SENASA (2019). *Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost*. Resolución Conjunta 1/19. Secretaría de Control y Monitoreo Ambiental y Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria.

Solano, M.L., Iriarte, F., Ciria, P., Negro, M.J. (2001). *SE—structure and environment performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and straw*. Journal of Agricultural Engineering.

Sylla Y.B., Watanabe T. Cho, K.J. and Kuroda, M. (2003). *Effect of the number of the vertical pipes for the passive aeration on the composting rate*. Dept. of Civil Engineering. Gunma University.

Tellez Monzón, L., Ortiz Dongo, L., Calle Maraví, J., Jorge Montalvo, P., Cesare Coral, M., & Visitación Figueroa, L. (2019). *Estabilización de la bosta de caballo mediante un proceso aeróbico similar al compostaje*. Revista de la Sociedad Química del Perú, 85(1), 25-33.

Thirion, F., Charbot, F. y Andeler, D. (1998). *Physical characterisation of animal manure*. RAMIRAN 1998 Conference, Rennes, Francia.

USDA — Natural Resources Conservation Service. (2010). *National Engineering Handbook, Part 637; Chapter 2: Composting*. United States Department of Agriculture. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720464003/Chapter%202%20-%20Composting.pdf>

West, B., Kathleen W. y Andrzej G. (2015). *Linear Mixed Models, A Practical Guide Using Stata Software*. Second Edition. CRC Press Taylor & Francis Group.

7. Anexo I

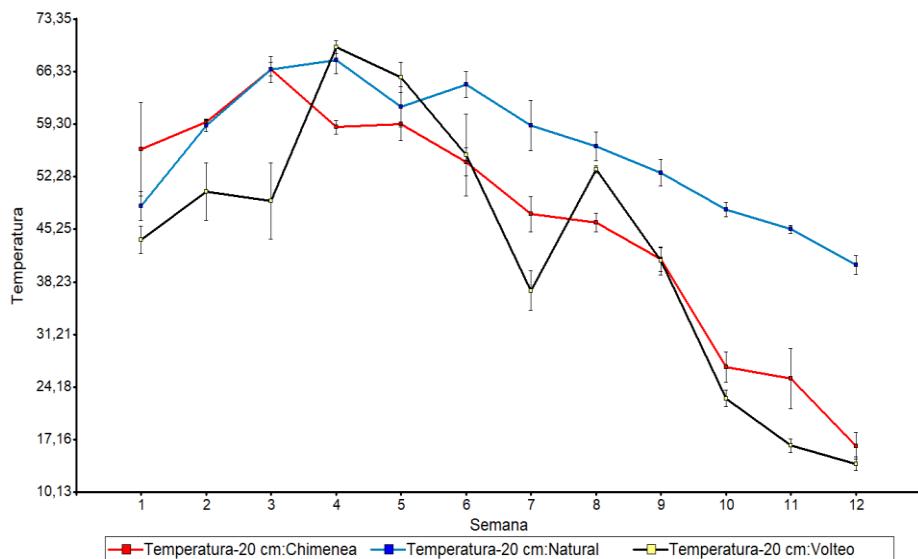


Figura 17.1: Evolución de la temperatura de las pilas durante el procedimiento de compostaje según las distintas metodologías de aireación a 20 cm de profundidad. Fuente: captura del software InfoStat.

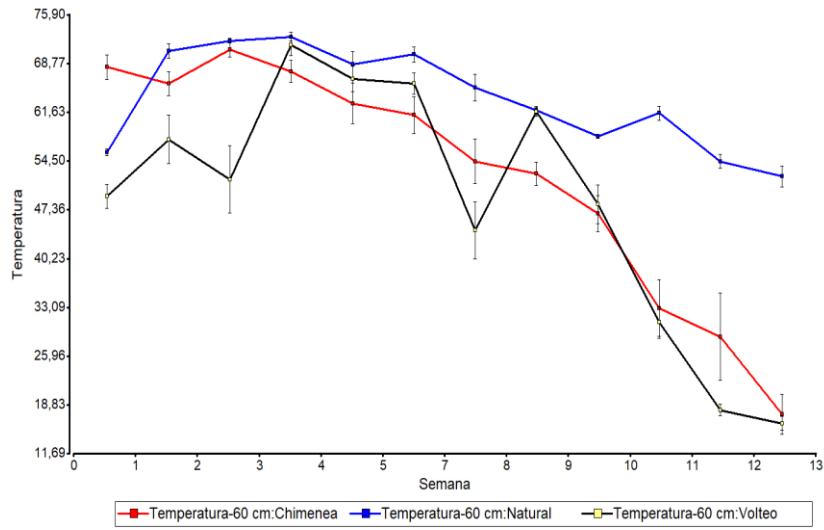


Figura 17.2: Evolución de la temperatura de las pilas durante el procedimiento de compostaje según las distintas metodologías de aireación a 60 cm de profundidad. Fuente: captura del software InfoStat.

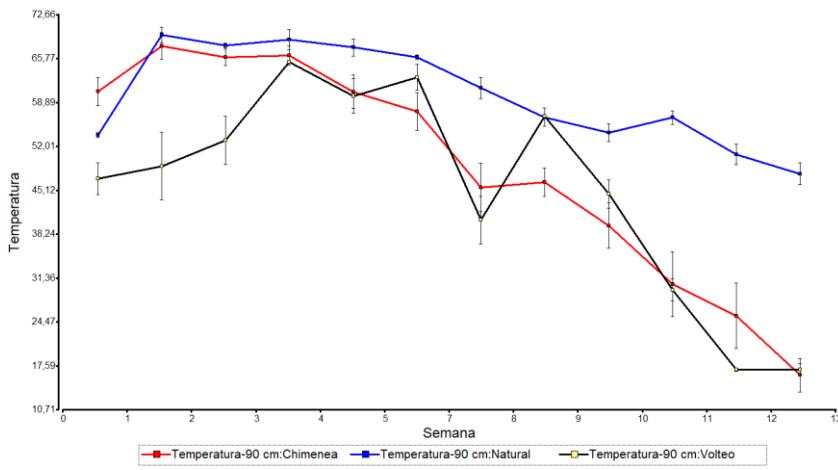


Figura 17.3: Evolución de la temperatura de las pilas durante el procedimiento de compostaje según las distintas metodologías de aireación a 90 cm de profundidad. Fuente: captura del software InfoStat.



Figura 17.4: Riego de la pila de sustrato homogeneizado. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el noroeste.



Figura 17.5: Disposición de los pallets utilizados para la conformación del sistema de aireación pasiva sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el oeste.



Figura 17.6: Conformación de la cama de escobajo utilizado en el sistema de aireación pasiva sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el noroeste.



Figura 17.7: Cama de escobajo utilizado en el sistema de aireación pasiva sin volteo.
Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el suroeste.



Figura 17.8: Inicio de la formación de la pila de compostaje con el sistema de aireación pasiva sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el noroeste.



Figura 17.9: Pila de compostaje con el sistema de aireación pasiva sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el suroeste.



Figura 17.10: Cama de escobajo correspondiente al sistema de aireación natural sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el suroeste.



Figura 17.11: Pila de compostaje con el sistema de aireación natural sin volteo. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el suroeste.



Figura 17.12: Pila de compostaje con el sistema volteo mecánico. Fuente: Imagen propia, tomada el día 22 de marzo de 2025, vista hacia el noroeste.



Figura 17.13: Primer volteo realizado en la pila de compostaje con el sistema volteo mecánico. Fuente: Imagen propia, tomada el día 28 de marzo de 2025, vista hacia el noreste.



Figura 17.14: Disposición de las pilas luego del primer volteo realizado en la pila de compostaje con el sistema volteo mecánico. Fuente: Imagen propia, tomada el día 28 de marzo de 2025, vista hacia el norte.



Figura 17.15: Apertura de la pila de volteo mecánico una vez dado por finalizado el procedimiento de compostaje. Fuente: Imagen propia, tomada el día 10 de junio de 2025, vista hacia el norte.



Figura 17.16: Imagen que detalla el compost obtenido de la pila de volteo mecánico una vez dado por finalizado el procedimiento de compostaje. La imagen muestra que el material obtenido mediante esta metodología de aireación es capaz de generar un material homogéneo en el lapso de 89 días. Fuente: Imagen propia, tomada el día 10 de junio de 2025.



Figura 17.17: Apertura de la pila de aireación natural sin volteo una vez dado por finalizado el procedimiento de compostaje. Esta metodología de aireación fue la que presentó la mayor acumulación de vapor de agua en su interior, lo cual se evidenció al abrir la pila a lo largo de su eje central y observar la liberación de dicho vapor. Fuente: Imagen propia, tomada el día 10 de junio de 2025, vista hacia el norte.



Figura 17.18: Compost obtenido de la sección central de la pila con aireación estática al finalizar el procedimiento de compostaje, donde se puede notar una capa blanquecina en el sustrato producto de la actividad degradativa de hongos y actinomicetos. Fuente: Imagen propia, tomada el 10 de junio de 2025.



Figura 17.19: Compost obtenido de la sección cercano a la superficie de la pila con aireación estática al finalizar el procedimiento de compostaje. A simple vista puede notarse que la acción degradativa de los microorganismos en las pilas de aireación estática no fue suficiente para generar un material homogéneo en el lapso de 89 días. Fuente: Imagen propia, tomada el 10 de junio de 2025.



Figura 17.20: Corte transversal de la pila de compost con aireación pasiva sin volteo, mostrando la fracción degradada por actividad fúngica, perceptible por su color blanquecino y mayor compactación respecto al material cercano a la superficie. Fuente: Imagen propia, tomada el 10 de junio de 2025.

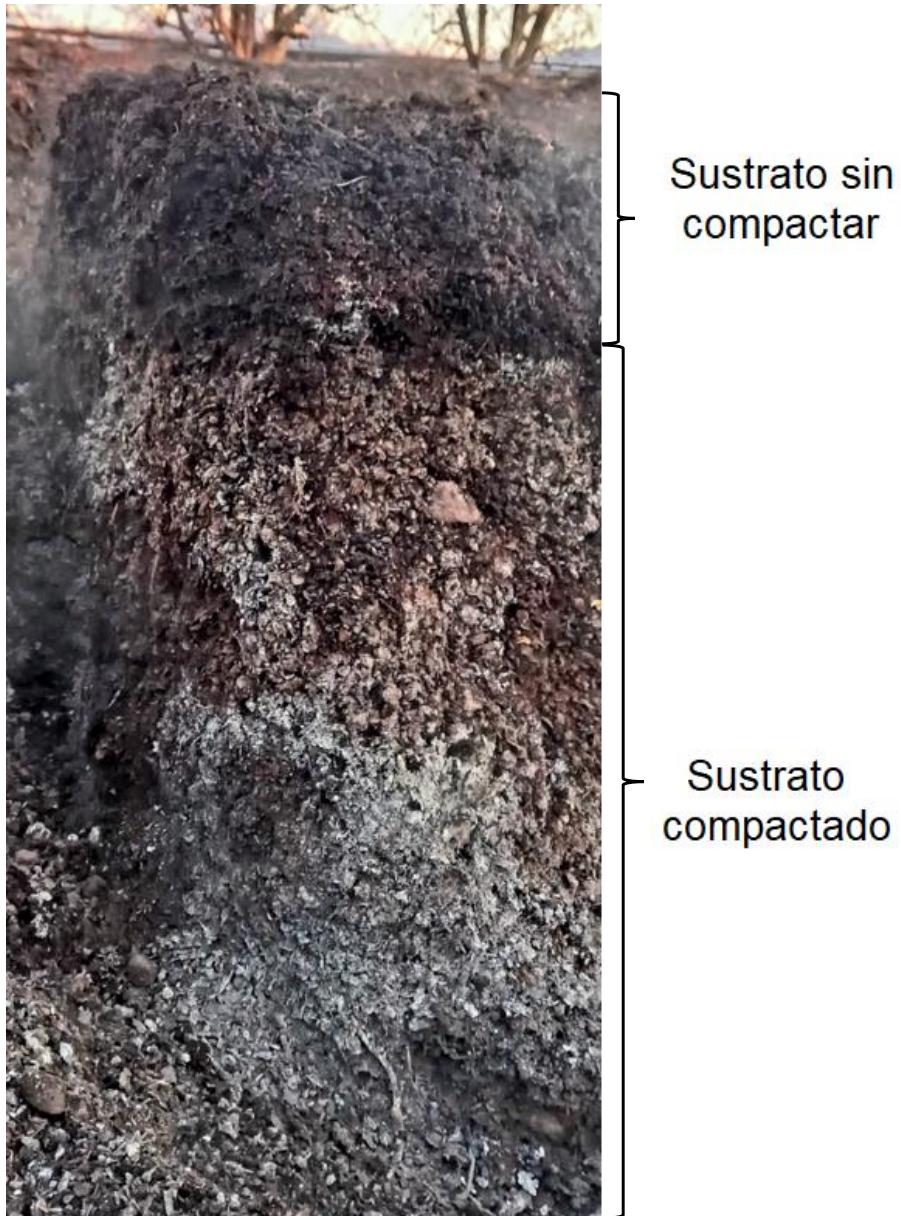


Figura 17.21: Corte transversal de la pila de compost con aireación natural sin volteo, mostrando la fracción degradada por actividad fúngica, perceptible por su color blanquecino y mayor compactación respecto al material cercano a la superficie. Fuente: Imagen propia, tomada el 10 de junio de 2025.