

Utilización de lodos residuales en el compostaje de orujos y escobajo en la industria vitivinícola

Use of winery sludge in pomace and grape stalks composting

Eduardo Arqueros¹, Rodrigo Morales-Vera¹, Rosa Roa Roco² y Alvaro Gonzalez²

¹Centro de Biotecnología de los Recursos Naturales (CENBIO), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Católica del Maule, Avda. San Miguel 3605, Talca, Chile

²Viña Concha y Toro S.A., Center for Research and Innovation, Fundo Pocoa s/n, Km10 Ruta K-650, Región del Maule, Penciahue, Chile

Resumen. Este estudio tiene por objetivo evaluar la factibilidad de integrar lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas vitivinícolas en el compostaje de orujos y escobajo. Los ensayos se llevaron a cabo en un viñedo de la zona central de Chile, se estudió la evolución del proceso de compostaje mediante el monitoreo de temperaturas, pH, humedad y densidad aparente. Se determinaron los efectos 3 distintas proporciones v/v de lodos (0, 10 y 20%), en las propiedades fisicoquímicas y el contenido de metales pesados durante la etapa mesófila inicial, termófila y mesófila tardía. Los resultados indican un incremento en el contenido de nutrientes y porcentaje de humedad al incorporar los lodos en las primeras etapas del proceso, además de mejorar la estructura física de las pilas. Sin embargo, existe un riesgo de fitotoxicidad asociado al contenido de metales pesados cuando el lodo es usado en mayores proporciones (20%). Con dosis menores (10%) se obtuvo un compost sin riesgos fitotóxicos y dentro de los parámetros establecidos por la normativa vigente en Chile. Por lo anterior, es factible integrar los lodos de la planta de tratamiento de aguas vitivinícolas, en una proporción de 10% de lodos y 90% de orujo y escobajo.

Abstract. This research concentrated on the evaluation of the feasibility to integrate winery sludge to the compost of grape pomace and grape stalks. These tests were carried out in a Vineyard on the Maule Valley in Chile, throughout the composting process, it was monitored temperature, pH, humidity, and apparent density. Also, it was determined the effects of different bulk portions in relation to physicochemical properties and the heavy metals content in the course of the 3 different phases of the composting process: the initial mesophilic stage, thermophilic stage, and the late mesophilic. An increase in the content of nitrogen, nutrients, and humidity was identified when incorporating winery sludges at the beginning of the process, also enriching the physical structure of the bulks. However, there is a risk of phytotoxicity linked to the heavy metals present when the proportion of mud is high. Meanwhile, a lower proportion (10%) accomplishes a resulting compost without phytotoxic risk and between the parameters of the current legislation in Chile, qualified as a B-class compost. Consequently, it is feasible to include winery sludge in the proportion v/v 10% sludge - 90% pomace and stalk.

1 Introducción

En los últimos años la industria vitivinícola chilena ha tenido un gran avance en políticas de sustentabilidad, especialmente si se considera que este aspecto es relevante para los mercados internacionales [1]. Para ello, se han establecido diferentes acuerdos y leyes con el fin de promover estrategias de producción limpia.

El compostaje es una de las técnicas más empleadas al momento de valorizar los residuos orgánicos, gracias a su bajo costo operacional y a la producción de un sustrato estabilizado denominado compost [2]. Diversos estudios han validado el uso del compost como enmienda o mejorador de algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, como: estructura, drenaje, aireación, retención de agua y nutrientes, prevención de la erosión, incremento de las comunidades bacteriológicas beneficiosas para el desarrollo vegetativo, entre otras [3-4]. Por lo anterior, distintas viñas han implementado esta estrategia para lidiar con sus residuos orgánicos.

Podemos definir al compostaje como un proceso de transformación natural de los residuos orgánicos regido

por microorganismos, los cuales degradan la materia orgánica produciendo un sustrato estabilizado y rico en nutrientes. Al ser un proceso protagonizado por microorganismos se deben proporcionar las condiciones fisicoquímicas adecuadas para su desarrollo, con el fin de asegurar el correcto desarrollo del compostaje y evitar la ocurrencia de dificultades, tales como malos olores, lixiviados peligrosos, bacterias fitotóxicas y una baja calidad agronómica en el compost originado [5].

El compostaje en base a desechos sólidos vitivinícolas se ve afectado principalmente por la presencia de sustancias fitotóxicas y antibacterianas, como etanol, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos, lo cual dificulta el desarrollo microbiano. Por lo que el proceso tiende a ser menos eficiente, lo que conlleva un compost de baja calidad agronómica [6]. Por tales motivos, se han empleado guanos y fertilizantes químicos ricos en nitrógeno con el objetivo de incrementar la carga microbiana y los nutrientes, con el fin de reducir las condiciones adversas que limitan la degradación [6-8]. No obstante, todas estas medidas han significado un gasto extra en los viñedos, además de dificultades operacionales,

por lo que existe una necesidad constante por parte de las compañías vitivinícolas en obtener fuentes rentables de nitrógeno, microorganismos y reguladores de pH con el fin de optimizar el proceso.

Durante la producción de vinos se generan aguas residuales, las cuales en una planta de tratamiento de agua son descontaminadas para posteriormente ser vertidas en cauces naturales. Durante este proceso se genera un desecho orgánico denominado “lodo”, equivalente al 5% de la totalidad de los desechos producidos por las bodegas [9]. La correcta disposición de estos residuos es una obligación y una necesidad constante de las industrias que poseen *Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR)*, lo que implica un costo considerable de transporte y disposición, comúnmente en un relleno sanitario o centros de tratamientos de desechos. Estos lodos se caracterizan por un alto contenido de nitrógeno, pH alcalino, elevada actividad microbiológica y un alto porcentaje de humedad [10]. Además de contener metales pesados debido al desgaste de los equipos empleados en la elaboración del vino [11]. Por ende, tiene características para ser revalorizados, lo que dependerá de su composición fisicoquímica.

El Fundo Lourdes, perteneciente a *Concha y Toro*, destaca dentro de la región del Maule por sus más de 1000 hectáreas y diversas variedades de vid cultivadas, donde casi un 90% de sus desechos son residuos orgánicos sólidos derivados de la uva, los que son sometidos al proceso de solarización en su totalidad. El proceso de solarización es una técnica de desinfección de desechos orgánicos que permite la eliminación de raíces, semillas de malezas y patógenos mediante altas temperaturas a través de la energía solar [12]. Las operaciones en una cancha de *solarización* no requieren del mismo manejo estandarizado como en una cancha de compostaje, por lo que existe un amplio margen de mejora en la optimización del proceso y manejo de los parámetros fisicoquímicos. Actualmente los lodos producidos por la viña no tienen un uso interno, siendo dispuestos a terceros para su correcta eliminación.

Gracias a las características presentes en este desecho se planteó su revalorización, incorporándolo al compostaje de orujo y escobajo, lo cual podría mejorar las condiciones del proceso y el compost resultante, además de reducir los costos de la bodega asociados al tratamiento de lodos. Sin embargo, debido a su composición fisicoquímica y a la presencia de metales pesados estos deben ser caracterizados y testeados con el fin de asegurar mezclas de residuos que conlleven al óptimo desarrollo del proceso y a la inocuidad del compost resultante.

Si bien los lodos de distintos procesos industriales están siendo utilizados a nivel mundial como enmiendas o fertilizantes orgánicos, existe una falta de información sobre el compostaje de lodos provenientes de la industria vínica [13].

Por lo anterior, se hace necesario estudiar en profundidad el compostaje de lodos vitivinícolas, con el fin de poder establecer parámetros que permitan optimizar su uso en la elaboración de compost dentro de las bodegas y asegurar la inocuidad de este. Por tales motivos, este trabajo tiene como fin evaluar la factibilidad técnica de integrar lodos provenientes de la planta de tratamiento de

aguas residuales de la bodega Lourdes en el compostaje de orujo y escobajo.

2 Metodología

Los ensayos se desarrollaron en las inmediaciones de la cancha de solarización del fundo Lourdes, perteneciente a la Viña Concha y Toro. Ubicada en el Fundo Pocoa, s/n Km 10, ruta K-650, Penciahue, Región del Maule. El periodo de ejecución fue de mayo del 2021 a enero del 2022. El territorio se ve afectado por una severa crisis hídrica, con pocas lluvias durante el año. La precipitación anual promedio es de 300 mm y las temperaturas varían con una máxima de 34°C en enero y -2°C en julio. Los desechos de orujo y escobajo se suministraron desde la bodega Lourdes, siendo estos cultivares de uva blanca. El procesamiento de esta clase de vino se caracteriza por no separar el orujo del escobajo, por lo que 1 kg de este residuo está conformado aproximadamente por un 65% orujo y un 35% escobajo. El lodo fue suministrado desde la planta de tratamientos de aguas residuales de la bodega Lourdes. Las características fisicoquímicas de las materias primas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de las materias primas a compostar.

Parámetro	Lodos	Escobajo-Orujo
pH (1:5)	8,3	3,4
% Humedad	89	50
C. Eléctrica (Ds/m)	15	3,6
Materia orgánica (%)	73	93
Carbono orgánico (%)	40	51,7
Nitrógeno total (%)	6,65	1,48
Rel. C/N	6,1	34,9
Amonio disponible (mg/kg)	5331	751
Nitrato disponible (mg/kg)	2206	344
Rel.NH4/NO3	2,4	2,2
Fosforo total (%)	2,2	0,92
Potasio total (%)	0,55	2,4
Densidad aparente(g/cm3)	0,78	0,31
Arsénico (mg/kg)	0,01	...
Cadmio (mg/kg)	0,01	...
Cobre (mg/kg)	590	...
Cromo (mg/kg)	14,1	...
Mercurio (mg/kg)	0,315	...
Níquel (mg/kg)	9,44	...
Plomo (mg/kg)	13,4	...
Zinc (mg/kg)	766	...

El diseño experimental fue completamente al azar (DCA), con 3 tratamientos y 3 repeticiones, haciendo un total de 9 unidades experimentales.

Se evaluaron 2 mezclas de lodos/escobajo-orujo, correspondientes a T1 y T2, más un testigo

correspondiente a T0, compuesto solo de escobajo y orujo, con el fin de evidenciar los efectos de incorporar lodos al proceso de compostaje. Los tratamientos se montaron en pilas de 41 m³ con un ancho de 2 m, por una altura de 1.5 m y un largo de 27 m. Las 3 proporciones de residuos (T0, T1 y T2) se especifican en la Tabla 2. El volumen de lodo empleado se estableció con el fin de impedir la saturación del espacio poroso y la acumulación de metales pesados, limitándose a un 10 y 20% del volumen total de la pila, además de facilitar el escalamiento industrial, dado a que los volúmenes de lodos producidos son inferiores al del orujo y escobajo.

Tabla 2. Detalles del volumen de cada tratamiento y de los desechos empleados.

Tratamiento	Lodo	Orujo-Escobajo	Total (m ³)
T0 (m ³)	0	41	41
T1 (m ³)	4,5	36,5	41
T2 (m ³)	8,5	32,5	41

Con el fin de mantener rangos de humedad adecuados, se aplicó riego por medio de un camión cisterna. El agua se suministró desde la planta de tratamientos de aguas de la bodega Lourdes.

El sistema de compostaje seleccionado corresponde al de pilas aireadas por volteo mecánico. Con el fin de aportar oxígeno, se realizaron volteos por medio de una volteadora de compost modelo sT-300. Los parámetros para realizar los volteos fueron: altos índices de humedad, altas temperaturas y la oxigenación del sistema.

Se registraron y evaluaron las temperaturas, humedad, pH y densidad aparente durante el desarrollo del compostaje, con el fin de mantener estables las variables críticas del proceso y monitorear su desarrollo. Se analizaron las propiedades fisicoquímicas y el contenido de metales pesados de cada pila en 3 puntos críticos del proceso, establecidos como inicio del proceso (proceso mesófilo inicial), etapa media (proceso activo termófilo) y etapa final (proceso mesófilo tardío), según lo descrito en la Tabla 3, con el fin de caracterizar y comparar su evolución.

Tabla 3. Análisis realizados a los tratamientos en los 3 puntos críticos del proceso.

Análisis químico	Análisis de metales pesados
Conductividad Eléctrica (CE)	Cobre (Cu)
pH	Cadmio (Cd)
Materia Orgánica (MO)	Cromo (Cr)
Carbono Total (C)	Níquel (Ni)
Nitrógeno Total (N)	Plomo (Pb)
Relación C/N	Zinc (Zn)
Fosforo Total(P)	
Potasio Total (K)	
Amonio y Nitrato (NH ₄ y NO ₃)	
Relación NH ₄ /NO ₃	

Al final del proceso se determinó la madurez del compost, a través de la prueba de Solvita, la fitotoxicidad

por medio de la prueba de germinación de *rábano*, se clasificó el tamaño de los agregados, se evaluó la calidad de los compost obtenidos y se analizó el contenido de patógenos, según lo descrito en NCh2880 y TMECC [14-15]. Adicionalmente, se evaluó el rendimiento del agua y el balance volumétrico de las pilas.

Se analizaron los parámetros obtenidos en los 3 puntos críticos del proceso, definidos como inicio, mediados y final, a través de un análisis de la varianza (ANOVA) con una significancia de 0,05 mediante el software Rstudio versión 1.4.1103-2017, con el fin de establecer si hubo diferencias entre las medias de los tratamientos. Acto seguido se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0,05 para determinar cuál o cuáles de las medias de los tratamientos fueron las diferentes.

3 Resultados y Discusión

La Figura 1 indica la evolución de la temperatura de los tratamientos y ambiental, los días donde se llevaron a cabo el riego y la oxigenación a través de volteos, actividades que afectan directamente el comportamiento de las temperaturas de las pilas. Los puntos de riego y volteo reflejan el día de aplicación y no un valor analítico. Las temperaturas registradas en promedio no presentaron diferencias entre los tratamientos. Al analizar las temperaturas podemos observar un patrón de comportamiento típico de este tipo de compostaje (Fig. 1). Todos los tratamientos alcanzaron temperaturas superiores a los 45 °C en la primera semana de compostaje. Las temperaturas máximas alcanzadas en las pilas fueron similares a otros estudios con residuos de bodega [16- 17].

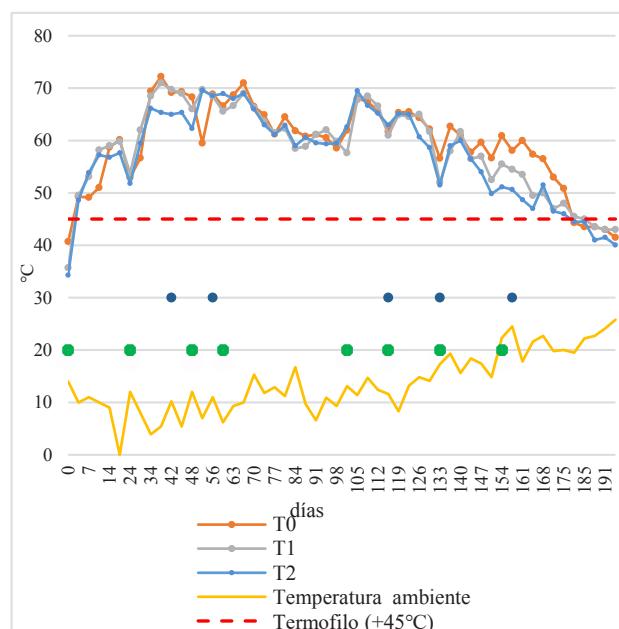


Figura 1. Comportamiento de la temperatura de cada tratamiento a lo largo del proceso de compostaje. Cada punto representa el promedio de triplicados cuya desviación estándar tuvo un rango entre 0 y 3,9.

Por ejemplo, Pinto *et al.* (2021) encontraron valores superiores a 60 °C a los 11 días de iniciado el compostaje de lodos de bodega en conjunto de escobajo [18]. El rango de temperaturas se mantuvo sobre los 55 °C por un periodo

de 155 días, debido a los altos volúmenes de material compostado. Es deseable que la temperatura no disminuya demasiado rápido, ya que, a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y la higienización [19]. Por lo tanto, las temperaturas reflejan el correcto desarrollo del proceso.

Durante los días 70 y 100 no se aplicaron volteos y riegos producto de problemas logísticos, lo cual afectó de levemente el desarrollo del proceso. Se evidenciaron los efectos de no oxigenar e irrigar las pilas en los tiempos establecidos, lo que conllevó a un descenso de las temperaturas entre los días 70 y 105. No se evidenció un incremento en las temperaturas a partir del octavo volteo, seguido de un descenso progresivo de estas. Respecto a esto, T0 tuvo una reducción paulatina en su temperatura en comparación a T2 y T1, lo cual nos indica una actividad microbiana aún en desarrollo.

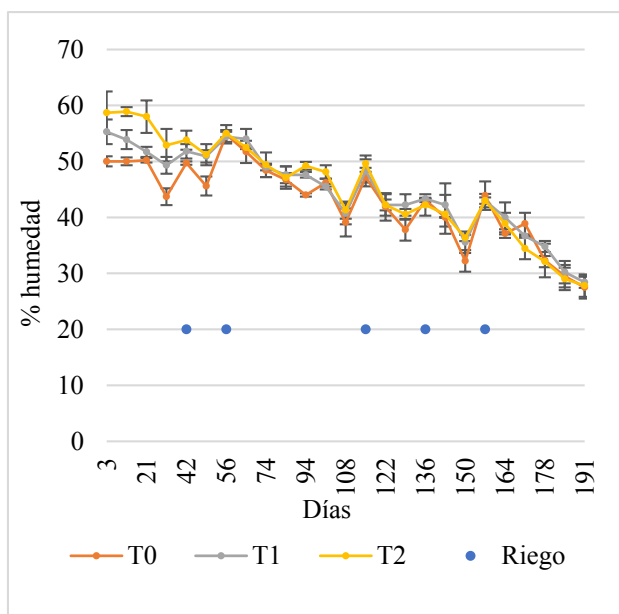


Figura 2. Evolución del porcentaje de humedad.

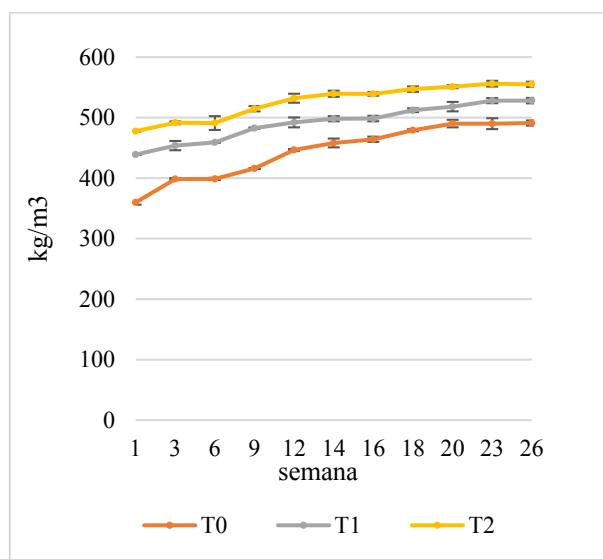


Figura 3. Evolución de la densidad aparente.

Se registró el porcentaje de humedad de cada pila y los días donde se realizaron riegos (Fig. 2). Los tratamientos iniciaron con valores de humedad acordes al óptimo

recomendado (entre 45 y 60%) no obstante, T1 y T2 presentaron un mayor porcentaje de humedad debido al lodo incorporado. La humedad fue un factor difícil de equilibrar a lo largo del proceso, debido a problemas logísticos durante las operaciones de riego, por lo que el porcentaje de humedad varió en todos los tratamientos. Si bien esto puede afectar negativamente el proceso, la humedad se mantuvo sobre un 40% en los primeros 150 días, por lo que el sistema se mantuvo estable. Al irrigar las pilas con una manguera a presión no se consiguió homogeneizar correctamente la humedad de las pilas, siendo necesarios volteos mecánicos, por lo que se sugiere implementar riegos a modo de lluvia. Con el fin de acelerar la estabilización de las pilas no se aplicaron riegos en el último mes del proceso. Las barras de error visualizadas en el gráfico (Fig. 2) son el producto de las desviaciones estándar de los triplicados de cada tratamiento.

La densidad aparente (Fig.3) refleja la estructura física de la pila y el espacio porosos de esta. Al acrecentar la densidad aparente en T2 este retiene de mejor forma la humedad, no obstante, esto afecta directamente el intercambio gaseoso que se produce en las pilas, por lo que, a mayor volumen de lodos, se requerirá de un mayor número de volteos (oxigenación). El aumento progresivo en la densidad aparente de los tratamientos es un comportamiento general en los procesos de compostaje [5, 19]. Siendo superior en T2 y T1 debido al lodo incorporado, el cual cambió la estructura física de la pila. Las barras de error son el producto de las desviaciones estándar de los triplicados de cada tratamiento.

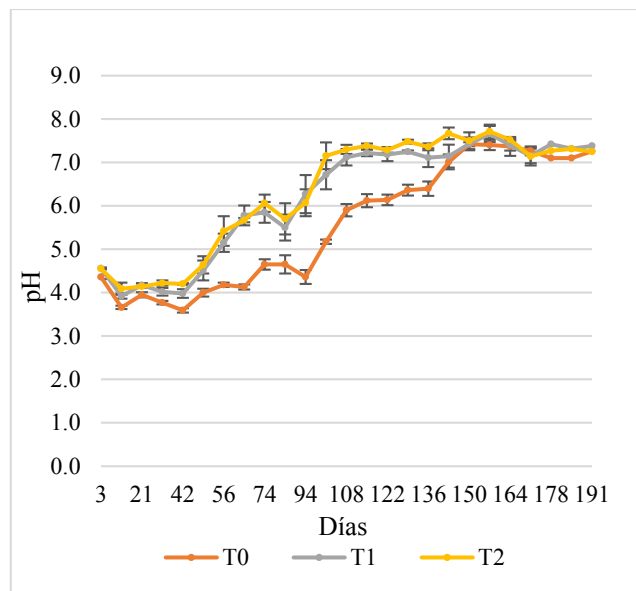


Figura 4. Evolución del pH.

Respecto al comportamiento del pH (Fig. 4) se identificó un aumento progresivo en el pH de los tratamientos, donde T1 y T2 evidenciaron una mayor velocidad en la estabilización a partir del día 48 en comparación a T0. Los tratamientos T1 y T2 se estabilizaron en un pH neutro a partir del día 108, por el contrario, T0 se estabilizó a partir del día 143. Las barras de error son el producto de las desviaciones estándar de los triplicados de cada tratamiento. El incremento del pH en T1 y T2 con respecto a T0 (Fig. 4) se relaciona

directamente con el lodo, el cual posee un pH alcalino. Al mejorar las condiciones microbiológicas se eleva la descomposición de la materia orgánica, lo que conduce a una mayor producción de NH₃ y, por ende, acelera la estabilidad del pH [20]. Los registros de pH obtenidos son similares a lo reportado por otros autores al compostar lodos vitivinícolas, donde a un mayor porcentaje de lodos, menor será el tiempo de estabilización de un pH ácido a uno neutro [17, 18].

Respecto al análisis fisicoquímico y el contenido de metales pesados en la fase mesófila inicial (Tabla 4), T2 y T1 destacan por tener una conductiva eléctrica superior en un 22% respecto a T0. El aumento en la conductividad eléctrica en T1 y T2 se relaciona directamente al uso del lodo, dado a que este posee una conductividad eléctrica sobre los 14 dS/m en comparación a los 3,6 dS/m del escobajo-orujo, lo que refleja a su vez un aumento en el contenido de nutrientes. El contenido de nitrógeno difirió significativamente en los tres tratamientos, donde T2 presentó un 28% y 14% más de nitrógeno en comparación a T0 y T1 respectivamente. El aumento del contenido de nitrógeno se atribuye directamente al lodo incorporado, el cual posee un 6,6 % de nitrógeno y una relación C/N de 6,1 lo que se contrasta con la relación C/N de 34,5 del escobajo-orujo, por lo que un 10% de lodo respecto al volumen total de la pila ya es suficiente para mejorar la relación carbono nitrógeno a un nivel óptimo de inicio.

Se identificó un contenido de materia orgánica inferior en un 7,7% en T1 y T2 con respecto a T0, lo cual corresponde a la mayor carga de materia orgánica presente en el escobajo y orujo respecto al lodo, lo que explica el mayor porcentaje de carbono en T0 con respecto a T1 y T2. La disminución de la relación C/N al aplicar lodos se ha evidenciado por otros autores al compostar residuos orgánicos [16-18, 21]. Lo que ha mejorado la actividad microbiana inicial. El aumento en el contenido de cobre y zinc en T1 y T2 se atribuible directamente al lodo empleado, el cual posee un elevado contenido de estos metales, por lo tanto, al emplear un porcentaje mayor de lodos se corre el riesgo de una sobre acumulación de cobre y zinc. Pinto *et al.* (2021) reportó un aumento en el contenido de P y K al implementar lodos vitivinícolas, lo cual no se observó en los tratamientos al inicio de este estudio [18]. Por lo que podemos deducir que el contenido de nutrientes está ligado a la composición inicial de las materias primas.

Respecto a la fase termófila (Tabla 5), se evidenció un mayor descenso de la materia orgánica en T1 y T2 con respecto a T0, con una diferencia del 10%, lo cual se atribuye a un mejor rendimiento en la degradación, influenciado por el lodo. Existe un cambio drástico en el pH atribuible al lodo suministrado, siendo T0 el más ácido debido a su composición de orujo y escobajo. T2 y T1 presentaron un pH superior en un 22% y 11% respectivamente en comparación a T0, además de un aumento del 20% en el contenido de nitrógeno con respecto a T0, lo cual redujo la relación C/N en T1 y T2.

El aumento del nitrógeno durante la fase termófila se relacionado directamente al uso de lodos, donde Bertrán *et al.* (2004) evidenció un aumento del 40% en el contenido de nitrógeno al compostar lodos en conjunto de escobajo, lo cual se relaciona a un proceso de nitrificación

más eficiente [16]. Se han evidenciado valores de pH, conductividad eléctrica y relación C/N similares en otros estudios al incorporar lodos agroindustriales en el proceso de compostaje de residuos orgánicos [13, 21, 22]. Al mejorar las condiciones para el desarrollo microbiológico mejora la movilización de fósforo, dado a que las comunidades microbianas interactúan de mejor forma, lo que explica su incremento en T1 y T2 con respecto a T0 [5]. Como observación, durante el desarrollo de la fase termófila se evidenció una mayor presencia de hongos en T1 y T2 con respecto a T0, lo cual puede deberse a una mayor disponibilidad de los nutrientes y a la densidad aparente que poseen las pilas, por lo que la materia es más susceptible al ataque microbiano [23]. Este registro solo se trató de una inspección visual ya que no hay resultados cuantitativos. Los valores de los metales pesados no se diferencias en gran medida del primer muestreo, siendo superiores el cobre y el zinc en T1 y T2 con respecto a T0.

Tabla 4. Resultados de los análisis fisicoquímicos y de metales pesados de los tratamientos en su fase mesófila inicial.

Parámetro	T0	T1	T2
pH *	3,6 b	3,8 a	3,9 a
C. Eléctrica (dS/m) *	3,7 b	4,5 ab	4,8 a
Humedad (%) *	48,9 a	53,7 b	59,7 c
Materia orgánica (%) *	91,2 b	84,3 a	83,8 a
Carbono (%) *	50,7 b	46,8 a	46,4 a
Nitrógeno (%) *	1,5 a	1,8 b	2,1 c
Rel. C/N *	34,5 a	26,0 b	22,5 c
Fosforo (%)	0,8	0,7	0,9
Potasio (%)	2,1	2,2	1,9
Amonio (mg/kg)	531,7	364,3	539,0
Nitrato (mg/kg)	391,3	586,3	456,0
Relación NH ₄ /NO ₃	1,4	0,6	1,2
Cadmio (mg/kg)	0,1	0,1	0,1
Cromo (mg/kg)	32,6	29,9	27
Níquel (mg/kg)	27,5	67,2	69,2
Plomo (mg/kg)	0,6	1,5	1,7
Cobre (mg/kg) *	36,3 b	50,3 a	51 a
Zinc (mg/kg) *	9 a	35,7 b	46,7 c

Una * frente al parámetro analizado indica la existencia de diferencias significativas según ANOVA ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos. Los tratamientos que comparten una misma letra no difieren significativamente, por el contrario, letras distintas establecen la existencia de diferencias significativas según la prueba de Tukey.

Al analizar la fase mesófila tardía (Tabla 6) se evidenció la estabilidad del pH en todos los tratamientos, siendo T1 superior a T2 y T0 por 0,2 décimas en la escala de pH. En lo que refiere al comportamiento de la conductividad eléctrica, esto es variable, siendo común el aumento de esta durante el proceso de compostaje, lo cual se debe a la mineralización de la materia orgánica; con lo cual se incrementa la concentración de nutrientes; y, en consecuencia, la de sales [5, 23]. Sin embargo, en algunos

casos, se observa que la conductividad eléctrica (C.E) llega a descender durante el proceso de compostaje; algunos autores recalcan que esto se debe únicamente a fenómenos de lixiviación de la masa [20].

Tabla 5. Resultados de los análisis fisicoquímicos y de metales pesados de los tratamientos en su fase termófila activa.

Parámetro	T0	T1	T2
pH *	3,9 b	4,7 ab	5,3 a
C. Eléctrica (dS/m)	4,8	5,8	4,8
Humedad (%)	48	52	52
Materia orgánica (%) *	88,3 b	79,7 a	77,8 a
Carbono (%) *	49 b	44,3 a	43,2 a
Nitrógeno (%) *	1,9 b	2,3 a	2,4 a
Rel. C/N *	26,1 b	19,2 a	17,8 a
Fosforo (%) *	1 b	1,3 a	1,4 a
Potasio (%)	2,4	2,4	2,1
Amonio (mg/kg)	276,7	613,3	453
Nitrato (mg/kg) *	228 b	179 ab	156 a
Relación NH ₄ /NO ₃	1,5	3,4	2,9
Cadmio (mg/kg)	0	0	0
Cromo (mg/kg)	54,6	30,5	36
Níquel (mg/kg)	40,9	52,2	59,7
Plomo (mg/kg)	1,3	1,5	2
Cobre (mg/kg) *	59,7 b	79 a	63,3 a
Zinc (mg/kg) *	14 a	40 b	57,3 c

La conductividad eléctrica fue menor en 0,5 dS/m en T2 y T1 respecto a T0 lo cual se explica probablemente por el descenso del contenido de NO₃ [23]. La baja relación C/N final se ha reportado en diferentes estudios al compostar lodos y orujo-escobajo, con valores en un rango de 17 a 20 [16, 18, 24]. Por ejemplo, Pinto *et al.* (2021) reportó un aumento del 13 % en el contenido de nitrógeno al compostar lodos y escobajos en una proporción de 2:1 respecto a una proporción 1:1 [18]. La relación C/N de T0 es propia del compostaje de orujo y escobajo, donde Carmona *et al.* (2012) obtuvieron rangos entre 15,5-18,2 al compostar orujo y escobajo en una proporción 1:1 [25].

T1 presentó un menor contenido de materia orgánica respecto a T0 y T2, relacionado a un mejor proceso degradativo, lo cual se ha evidenciado al usar guanos y lodos en el compostaje de orujo y escobajo [26-27]. Los valores de C.E encontrados en este experimento son aceptables para las propuestas agrícolas, ya que están por debajo del valor máximo recomendado de 3 dS/m [15].

El contenido de amonio fue superior en un 50% en T2 y T0 con respecto a T1, lo cual puede deberse a un mayor grado de inmovilización de N por los microorganismos y a fenómenos de volatilización de N [23]. Se evidenció un aumento en el contenido de fósforo en T1 respecto a T2 y T0 (cerca de un 20% más) lo cual demuestra la mejor calidad nutritiva de T1 y un mejor rendimiento de los microorganismos para movilizar fuentes de fósforo, respecto a esto, su mineralización está regulada por la

biomasa microbiana que es el componente orgánico central del ciclo del fósforo contenido en el material orgánico, por lo que, al mejorar las condiciones para el desarrollo microbiano (Rel. C/N, humedad y pH) aumenta el contenido de fósforo [5]. Respecto a esto, es recomendable analizar el comportamiento de los microorganismos responsables de la mineralización de fósforo. El contenido de potasio fue superior en T0 con respecto a T1 y T2 en un 15%, lo cual podemos asociar a la cantidad de materia orgánica que posee el tratamiento, por lo que, al estar constituido solo por escobajo y orujo existe una mayor disponibilidad de este nutriente, el cual posee un 78% más de potasio respecto al lodo según los análisis de las materias primas.

Tanto el cobre y el zinc son superiores en T1 y T2 con respecto a T0, con un aumento progresivo en el tiempo con respecto a la fase inicial, sin embargo, los valores están dentro de lo estipulado por la normativa vigente. El aumento progresivo en el contenido de metales pesados se puede asociar a una contaminación derivada del agua utilizada para humectar las pilas (camión cisterna), por lo que se sugiere analizar el agua con el fin de prevenir la acumulación de metales en el compost. T1 cumple con todos los parámetros fisicoquímicos y de metales pesados dispuestos por la NCh2880, siendo catalogado como un compost clase B, debido a la presencia de metales pesados.

Tabla 6. Resultados de los análisis fisicoquímicos y de metales pesados de los tratamientos en su fase mesófila tardía.

Parámetro	T0	T1	T2
pH *	7 c	7,2 a	6,9 b c
C. Eléctrica (dS/m) *	1,4 a	1,4 a b	2 b
Humedad (%)	24,0	26,3	23,0
Materia orgánica (%) *	75,0 a	62,7 b	70,0 a
Carbono (%)	41,7	34,8	38,9
Nitrógeno (%)	2,6	2,2	2,4
Rel. C/N	15,6	16,9	16,1
Fosforo (%) *	2,4 a	2,9 b	2,3 a
Potasio (%) *	3,4 a	3 a b	2,7 b
Amonio (mg/kg) *	634,0 a	190 b	441,3 a
Nitrato (mg/kg)	182,0	126,7	162,3
Relación NH ₄ /NO ₃	3,6	1,5	2,8
Cadmio (mg/kg)	0	0	0
Cromo (mg/kg) *	145,8 c	64,1 a	135,7 b c
Níquel (mg/kg)	25	22,4	11,5
Plomo (mg/kg) *	5,1 a	8,2 b	11,3 c
Cobre (mg/kg) *	112,3 a	93 a	160,7 b
Zinc (mg/kg) *	20,7 a	59,7 b	121,7 c

La prueba de Solvita proporciona un índice del grado de madurez del compost obtenido, dependiendo de los niveles de CO₂ y NH₃ de la muestra analizada. Los resultados de las paletas reactivas y el índice de madurez se observan en la Tabla 7. Al comparar los valores obtenidos en las tabletas de NH₃ y CO₂ con los valores de referencia del fabricante se obtuvo el índice de madurez presente en los tratamientos. Un índice de maduración en

un rango de 7-8 se considera propio de un compost maduro y estabilizado.

Al analizar los resultados de la prueba de Solvita (Tabla 7) se observa que el grado de madurez del compost se asemeja a valores entre 6-7 en todos los tratamientos, calificándolo como un compost en vías de maduración. La prueba Solvita proporciona un índice del grado de madurez del compost obtenido, dependiendo de los niveles de CO₂ y NH₃ de la muestra analizada. Aunque es una prueba de tipo no cuantitativo, su fiabilidad y validez han sido demostradas científicamente [23]. Estos resultados demuestran un bajo contenido de NH₃ y CO₂ lo cual es propio de las últimas fases del proceso de compostaje [5].

Tabla 7. Resumen de los resultados de las paletas de NH₃ y CO₂ con el índice de madurez obtenido.

Tratamiento	NH ₃	CO ₂	Índice de madures Solvita
T0	5	7	7
T1	5	6	6
T2	5	6	6

Los resultados de los análisis bacteriológicos aplicados a muestras compuestas de compost (Tabla 10) evidenciaron un número anormal de coliformes fecales, fuera de los rangos óptimos según la normativa vigente (<1000 NMP/g) en T0, siendo T2 y T1 los único que cumplen con la normativa. No se detectó la presencia de Salmonella en todos los compost finales.

El resultado bacteriológico anormal de T0 pueden tener distintas causas, por lo que se recomienda analizar el contenido bacteriológico del agua de la planta de tratamiento. Al superar los 1000 NMP/g de coliformes fecales no se cumplen los requisitos bacteriológicos para su uso según la normativa vigente [15]. Respecto a este punto, Bustamante *et al.* (2009) afirman que un sistema con ventilación forzada funciona mejor para reducir el nivel general de patógenos en mezclas de orujo, escobajo y lodos en comparación a un sistema de pilas por volteo mecánico, con la observación de que el mantenimiento de altas temperaturas no siempre asegura la eliminación de dichos microorganismos. Además, indican de que otros factores como la humedad, la disponibilidad de nutrientes o la competencia con otros microorganismos puede afectar a la reactivación de algunos grupos de microorganismos, por lo que se recomienda evaluar el compost durante su maduración [28].

La prueba de germinación de rabanito (Fig. 5) dejó en evidencia un alto grado de fitotoxicidad presente en las pilas T0 y T2 en comparación a T1 el cual fue el único tratamiento que presentó valores superiores al 80%, clasificado como no fitotóxico, lo cual difiere con otras investigaciones. Pinto *et al.* (2021) registraron porcentajes de germinación superiores al 80% en todos los tratamientos compuestos de lodos y escobajo [18].

Los efectos fitotóxicos en T0 y T2 pueden deberse a distintos factores, como el aumento en el contenido de metales pesados. Dado a que se analizó el compost previo a la etapa de maduración es probable que aún no se formarán los componentes húmicos y antibióticos

presentes en el compost maduro, por lo que se recomienda analizar el porcentaje de germinación en la fase de maduración [29].

En términos de uso de agua (Tabla 8), no se aprecian grandes diferencias entre T1 y T2, sin embargo, estos difieren de T0, el cual requirió de un mayor volumen de agua para conseguir un nivel óptimo de humedad, esto se debe a que al emplear lodos mejora la estructura física de la pila, proporcionando una mayor retención de agua durante los riegos. Al comparar lo m³ se identificó que T1 requirió de un 47,7% más de agua en comparación a T2 y T1 a lo largo del proceso de compostaje.

Respecto al balance del volumen (Tabla 9) se identificó una mayor reducción en el volumen de T1 y T2 en comparación a T0, con una diferencia del 10% lo cual se asocia al mayor rendimiento en la degradación de los tratamientos con lodos. No se identificaron diferencias respecto a la reducción del volumen y el riego proporcionado entre T1 y T2.

Tabla 8. Balance del agua de riego incorporada en cada pila experimental (en m³).

Riego	T0	T1	T2	Agua total incorporada (m ³)
Riego N-1	7	3	3	13
Riego N-2	10	3,5	3,5	17
Riego N-3	8	4	4	16
Riego N-4	10	6	6	22
Riego N-5	10	5	5	20
Total (m ³)	45	21,5	21,5	88

Tabla 9. Balance del volumen de las pilas experimentales.

Tratamiento	Volumen inicial (m ³)	Volumen final (m ³)	Reducción (%)
T0	41	31	24,3
T1	41	29,7	29,2
T2	41	28,6	30,2

Tabla 10. Análisis bacteriológico del compost final (muestras compuestas).

Análisis	T0	T1	T2
Coliformes fecales (NMP/ g)	2,2 x 10 ³	4,9 x 10 ²	4,9 x 10 ²
Salmonella	Ausencia	Ausencia	Ausencia

Sobre la clasificación del tamaño de las partículas y de los inertes presentes (Tabla 7) se observan diferencias significativas entre los tratamientos en dos fracciones específicas (Partículas entre 4 mm-2 mm y partículas <2 mm) según los análisis estadísticos realizados (Anexo 29). No se encontraron inertes > 16 mm. No se identificaron diferencias en el número de inertes totales < 16 mm.

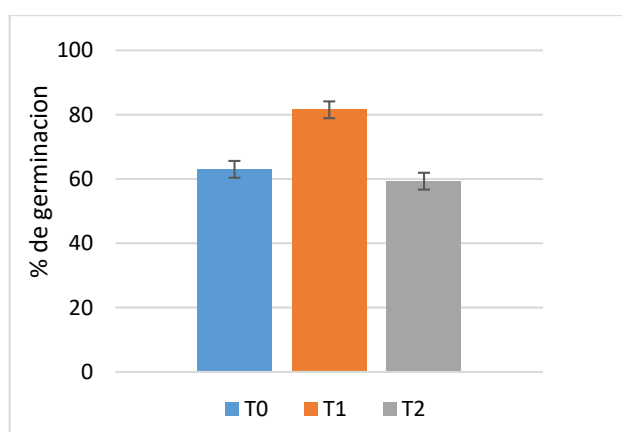


Figura 5. Resultado de los promedios obtenidos en la prueba de germinación de rábano.

T1 y T0 cumplen lo descrito por la normativa en términos de porcentaje de inertes menores a 16 mm. Al analizar la fracción entre 4 mm y 2 mm se evidenció que esta sección está compuesta en su mayoría por semillas de uva, donde se identificó una reducción en el contenido de este proporcional equivalente al porcentaje de lodos suministrados, por lo que se puede deducir que el lodo aumenta la degradación de semillas.

4 Conclusiones

En general, la incorporación de lodos vitivinícolas en un 10% V/V en el compostaje de orujo y escobajo genera un efecto positivo inicial en la disponibilidad de nutrientes, pH y densidad aparente del proceso y del compost obtenido. Por lo tanto, es viable la utilización de lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas del fundo Lourdes en el compostaje de la planta productora de vino.

El análisis de la evolución del proceso a través del monitoreo de temperaturas, pH, contenido de humedad y densidad aparente, permite concluir que la incorporación de lodos en no más de 10% v/v genera condiciones adecuadas para que el proceso de compostaje sea un método eficiente para el tratamiento de este tipo de residuos.

Con un 10% v/v de lodo incorporado se obtuvo un efecto positivo en las propiedades químicas y físicas en la etapa mesófila, termófila y mesófila final, lo cual mejoró la degradación de la materia orgánica, fomento la estabilización del pH e incremento el contenido de nutrientes. Además de prevenir la acumulación de metales y optimizar el uso del agua durante las operaciones de riego.

La proporción T1 asegura un compost sin riesgos fitotóxicos y dentro de los parámetros establecidos según la normativa vigente, calificado como un compost clase B. Finalmente, es factible integrar los lodos producidos por la planta de tratamientos de aguas del fundo Lourdes en la proporción mencionada (10% lodos – 90% orujo y escobajo).

Referencias

1. J. Martínez-Blanco, C. Lazcano, T. Christensen, P. Muñoz, J. Rieradevall, *Beneficios del compost para la agricultura a través de la evaluación del ciclo de vida,*

2. *una revisión*, EDP Sciences **33** (2013)
2. C. Buzzetti, *Una mirada al mercado vitivinícola nacional e internacional*, CIS, 18 (2018)
3. S. G. Wilson, J.-J. Lambert, R. Dahlgren, *Aplicación de abono a suelos degradados de viñedos: efecto sobre la química del suelo, la fertilidad y el rendimiento de la vid*, AJEV **72**, 85 (2020)
4. L. Barbaro, M. Karlanian, P. Rizzo, N. Riera, *Caracterización de diferentes tipos de compost para su uso como componente de sustratos*, Chilean J. Agric. Anim. Sci. **35**, 126 (2019)
5. M. Day, K. Shaw, *Procesos biológicos, químicos y físicos del compostaje*, CRC Press **1**, 1–34 (2001)
6. M. Martínez Salgado, R. Ortega, M. Janssens, P. Fincheira, *El compost de orujo de uva como fuente de materia orgánica: Evolución de los parámetros de calidad para evaluar la madurez y la estabilidad*, JCP **216**, 56–63 (2019)
7. Ó. Sánchez, D. Ospina, S. Montoya, *Suplementación de compost con nutrientes y microorganismos en el proceso de compostaje*, RWM **69**, 136–153 (2017)
8. E. G. Pisi, *Compostaje de orujo de uva agotado y uso del compost obtenido como componente de sustrato para plantines florales*, UNLZ, 55-140 (2016)
9. M. Guillen, J. C. Zamora, *Valorización de residuos y subproductos de la industria vitivinícola*, 4-27(2018)
10. M. P. Zacharof, *Residuos de bodega de uva como materia prima para bioconversiones: aplicación del concepto de biorrefinería*, WBV **8** (2017)
11. N. M. Ojeda, *Reingeniería del tratamiento y la disposición final de efluentes industriales en bodega Los Haroldos*, UNC, 74 (2018)
12. J. Arboleya, *Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas*, INIA **1**, 4–96 (2018)
13. A. B. Morales, M. A. Bustamante, F. C. Marhuenda-Egea, R. Moral, M. Ros, J. A. Pascual, *Gestión de lodos agroalimentarios mediante diferentes estrategias de co-compostaje: Estudio del valor añadido de los compost obtenidos*, JCP **121**, 186–197 (2016)
14. D. A. USA, *Métodos de prueba para el examen de compostaje y compost* **2**, 1–27 (2002)
15. I. N. de Normalización. *Norma Chilena de compostaje 2880:2015*, INN, 15 (2015)
16. E. Bertran, X. Sort, M. Soliva, I. Trillas, *Compostaje de residuos de bodega: Lodos y raspones de uva*, BT **95**, 203–208 (2004)
17. M. A. Bustamante, C. Paredes, J. Morales, A. M. Mayoral, R. Moral, *Estudio del proceso de compostaje de residuos de bodegas y destilerías mediante técnicas multivariantes*, Tec. Bioam **100**, 4766–4772 (2009)
18. R. Pinto, L. M. Brito, F. Gonçalves, I. Mourão, L. Torres, J. Coutinho, *Reciclaje de residuos de la industria vitivinícola del Duero mediante compostaje*, ISHC **1305**, 285-292 (2021)
19. P. Román, M. M. Martínez, A. Pantoja, *Manual de Compostaje del Agricultor, Experiencias en América Latina*, FAO, (2013)
20. P. Bueno, J. Díaz, F. Cabrera, *Capítulo 4: Factores que afectan al proceso de Compostaje*, Compostaje, 93-110 (2008)

21. F. J. Fernández, V. Sánchez-Arias, L. Rodríguez, J. Villaseñor, *Viabilidad de combinaciones de compostaje de lodos de depuradora, residuos de almazara y residuos de bodega en un reactor de tambor rotatorio*, WM **30**, 1948–1956 (2010)
22. S. Semitela, A. Pirra, F. G. Braga, Impacto de las condiciones de co-compostaje mesófilo en la calidad de los sustratos producidos a partir de lodos activados y raspones de uva: estudios a escala de laboratorio y escala piloto, *Bio. Tec.* **289**, 121622 (2019)
23. J. Moreno Casco, R. Morales Herrero, *Compostaje (edición científica)*, **1** (2008)
24. M. A Bustamante, et al, *Co-compostaje de residuos de destilerías y bodegas con lodos de depuradora*, WST **56** 187–192 (2007)
25. E. Carmona, M. T. Moreno, M. Avilés, J. Ordovás, Compostaje de residuos de la industria vinícola y su uso como sustrato para el cultivo sin suelo de plantas ornamentales, SJAR **10** 482–491 (2012)
26. I. Fuentes, S. Fernandez, L. Martínez, G. Darío, *Compostaje de orujo de uva y guano Caprino para la producción de plantines de lechuga* (2018)
27. L. A. Barbaro, et al. *Compost de guano de gallina en la composición de sustratos para la producción de plantines florales*, *Agri. Scie.* **30**, 25–35 (2013)
28. M. A. Bustamante et al, *Evolution of the pathogen content during co-composting of winery and distillery wastes*. *Bior. Tec.* **99** 7299–7306 (2008)
29. F. Zucconi, M. Pera., Forte, M. Bertoldi, *Evaluación de la toxicidad del compost inmaduro*, *Biocic.* 54–57 (1981)