

UNIVERSIDAD DE O'HIGGINS
ESCUELA DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS,
ANIMALES Y AMBIENTALES

**EFFECTO DEL BIOCHAR COMO ADITIVO EN LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL CO-COMPOSTAJE DE
GUANO DE CERDO Y PAJA DE MAÍZ Y SU POTENCIAL USO EN
LA ELABORACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS.**

GONZALO ALBERTO CARREÑO CACERES

Tesina presentada para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo

Profesor guía
JORGE MEDINA OTAROLA
Profesor co-guía
RODRIGO CONTRERAS SOTO

2022
Rancagua, Chile

UNIVERSIDAD DE O'HIGGINS
ESCUELA DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS,
ANIMALES Y AMBIENTALES

**EFEECTO DEL BIOCHAR COMO ADITIVO EN LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL CO-COMPOSTAJE DE
GUANO DE CERDO Y PAJA DE MAÍZ Y SU POTENCIAL USO EN
LA ELABORACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS**

GONZALO ALBERTO CARREÑO CACERES

Tesina presentada para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo

Calificaciones

PROFESOR GUÍA

Jorge Medina Otárola

Ingeniero Agrónomo, Doctor en Ciencias de Recursos Naturales

PROFESOR COLABORADOR

Rodrigo Contreras Soto

Ingeniero en Biotecnología, Doctor en Genética y Mejoramiento Vegetal

PROFESORES EVALUADORES

Claudia Rojas Alvarado

Ingeniero Agrónomo, Doctora en Ciencias del suelo y Biogeoquímica

Set Pérez Fuentealba

Ingeniero Agrónomo, Doctor en Fitopatología

2022

Rancagua, Chile

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el inmenso apoyo que mis padres y hermanos me han entregado a lo largo de este arduo proceso. A mis compañeros y amigos futuros colegas quienes siempre me brindaron palabras de ánimo y momentos gratos. Quiero agradecer también a Bettsabe, quien ha sido una parte fundamental durante mi paso por la universidad.

De igual forma agradezco la ayuda y la guía del profesor Jorge Medina, quien junto a los profesores colaboradores Claudia Rojas y Rodrigo Contreras no dudaron en entregar todos sus conocimientos y paciencia para resolver las dudas que surgieron en el camino. Agradezco también la ayuda incondicional de Pilar Fuenzalida durante el trabajo de laboratorio.

También quisiera hacer mención al proyecto del profesor Jorge Medina que me permitió realizar mi proyecto de tesis. Así como también a la empresa Agrícola AASA, que me facilitó el guano de cerdo para llevar a cabo el ensayo en cuestión.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
HIPÓTESIS	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2.-MATERIALES Y MÉTODOS	15
2.1.- Lugar de estudio	15
2.2 Materiales orgánicos compostados y biochar como aditivo.	15
2.3.- Proceso de compostaje y diseño experimental.	16
2.4 Monitoreo del proceso de co-compostaje.	17
2.5.1 Propiedades físicas.	18
2.5.2 Densidad aparente	18
2.5.3 Distribución del tamaño de partículas	19
2.5.4 Capacidad de retención de agua	20
2.6 Análisis de propiedades químicas y biológicas de los sustratos finales.	21
2.6.1 Materia orgánica y carbono orgánico total	21
2.6.2 pH y Conductividad eléctrica.	22
2.6.3 Índice de estabilidad a través de las emisiones de CO₂ y NH₃ a través del uso de la prueba SOLVITA®.	22
2.6.4 Análisis de fitotoxicidad como indicador de calidad del producto final a través del índice de germinación (IG)	23
2.7 Análisis estadístico	24
3 RESULTADOS	25
3.1 Monitoreo del proceso:	26
3.1.1 Temperatura de las pilas de compost durante el proceso de co-compostaje.	26

3.1.2 pH durante el proceso de co-compostaje.....	27
3.1.3 Conductividad eléctrica durante el proceso de co-compostaje	28
3.2 Caracterización física de los productos finales del proceso de co-compostaje.	29
3.2.1 Distribución del tamaño de partículas.....	29
3.2.2 Capacidad de retención de agua (CRA).....	31
3.3 Caracterización química y biológica de los productos finales del proceso de co-compostaje.....	32
3.3.1 Materia orgánica y carbono orgánico total.....	32
3.3.2 pH y Conductividad eléctrica del compost final.....	33
3.3.3 Análisis de estabilidad a través de la prueba SOLVITA®	33
3.3.4 Análisis de la fitotoxicidad a partir del índice de germinación (IG).....	35
4 DISCUSIÓN	37
CONCLUSIÓN.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45
APÉNDICE.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos y proporciones de materiales en cada uno.	16
Tabla 2. Caracterización inicial de materiales utilizados en el proceso de co-compostaje y valores de referencia sugeridos por la Norma Chilena de Compostaje (NCh2880).	25
Tabla 3. Rango de apertura de las fracciones de tamaño de partículas.	30
Tabla 4. Distribución del tamaño de partículas en los distintos tratamientos al término del proceso de co-compostaje.	30
Tabla 5. Densidad aparente de los distintos tratamientos al término del proceso de co- compostaje.....	31
Tabla 6. Análisis de la varianza del % de la Capacidad de Retención de Agua (CRA) del sustrato final.	32
Tabla 7. Materia orgánica (MO) y Carbono orgánico total (COT) del sustrato final.	32
Tabla 8. Análisis de la varianza para los parámetros pH y CE en los distintos tratamientos al término del proceso de co-compostaje.	33

Tabla 9. Índice de germinación en dos diluciones (1:10 y 1:15) para los distintos tratamientos al final del proceso de co-compostaje.	36
Tabla 10. Comparación de la calidad del sustrato final (Figura 4 del apéndice) respecto de lo establecido según la NCh2880 y según Abad et al., (1993). Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura de las pilas de compost durante el proceso de co-compostaje. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar). La temperatura se analizó tanto en horario am como pm y los valores corresponden a las mediciones de la tarde (16 horas).....	27
Figura 2. Variación en el pH del compost durante el proceso de co-compostaje. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).	28
Figura 3. Variación de la conductividad eléctrica durante el proceso de co-compostaje. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).	29
Figura 4. Análisis SOLVITA® para la emisión de CO ₂ . Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).	34
Figura 5. Análisis SOLVITA® para la emisión de NH ₃ . Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).	35
Figura 6. Índice de germinación para semillas de rabanito. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).....	36

ÍNDICE DE FIGURAS DEL APÉNDICE

Figura 1. Cajas plásticas donde se realizó el co-compostaje	51
Figura 2. Tratamientos de izquierda a derecha: CB2-Control-CB1.....	51
Figura 3. Presencia de micelio en tratamiento Control en el día 28.	52
Figura 4. Compost maduro (CB2) al día 94 desde el inicio del ensayo.....	52
Figura 5. Medición de temperatura interna del reactor.....	53
Figura 6. Doble horno pirolizador donde se generó el Biochar utilizado	53
Figura 7. Interior del horno pirolizador.	54

RESUMEN

Durante los últimos años el uso de plantines hortícolas ha ido en aumento, y con ello también el uso y desarrollo de diversos sustratos orgánicos e inorgánicos. Es importante conocer la composición de los sustratos orgánicos generados a partir de tecnologías como el co-compostaje que hace referencia a la combinación de materiales con aditivos en un proceso aeróbico y que tiene como objeto mejorar el proceso de compostaje y las características fisicoquímicas del sustrato final. Esto permitiría optimizar el proceso de estabilización y elegir el sustrato más adecuado para los cultivos. Por lo tanto, a partir de lo anterior se propuso como objetivo evaluar el efecto del biochar como aditivo en el proceso de co-compostaje de residuos agropecuarios en las propiedades fisicoquímicas del proceso y en la calidad del producto final para su posterior uso en el diseño de sustratos de interés hortícolas. Para cumplir con este objetivo se llevó a cabo el co-compostaje de residuos silvoagropecuarios en el que se definieron tres tratamientos que consisten en el compostaje de mezclas de Paja de maíz, Guano de cerdo (Control) y dos dosis distintas de biochar como aditivo al inicio del proceso (CB1 y CB2). Cada tratamiento contó con tres repeticiones, que se dispusieron en forma aleatoria en reactores plásticos a escala de laboratorio bajo condiciones de invernadero. Se midieron las propiedades fisicoquímicas (pH, CE, contenido de carbono, materia orgánica, sólidos totales, índice de germinación, madurez y densidad aparente) del sustrato mediante distintos análisis químicos y físicos. A partir de lo anterior, se observó una mejora en la calidad del compost final en los parámetros de pH, CE, Capacidad de Retención de Agua y fitotoxicidad. Los resultados de este trabajo serán de gran ayuda para elaborar compost de manera rápida y eficiente, con el fin de disminuir el uso de la turba en el cultivo de hortalizas.

Palabras clave: Valorización de residuos agrícolas, carbón pirogénico, co-compostaje, sustratos orgánicos.

ABSTRACT

During the last years, the use of seedlings has been increasing, and with this also the use and development of various organic and inorganic substrates. It is important to know the composition of substrates generated from co-composting, which refers to the process of composting organic materials in combination with other materials such as additives that can improve and optimize the process and the physicochemical characteristics of the final substrate. This can improve the process of composting and the selection the most suitable end-products for its utilization substrate for crops. Therefore, the objective of this research was to evaluate the effect of biochar as additive in the co-composting process of agricultural residues on the physicochemical properties of the process and final product for being used as organic substrate in horticulture crops. For this, three treatments were conducted, consisting in the mixture of corn cane, pork slurry as control composting systema and biochar at different dosses of application. Each treatment had three repetitions, which were randomly arranged in plastic boxes in the greenhouse. Physicochemical properties (pH, CE, carbon content, organic matter, total solids, germination rate, maturity and apparent density) of the substrate were measured by means of different chemical and physical analyses. From the above, an improvement was observed in the quality of the end-compost in pH, EC, Water Retention Capacity and phytotoxicity. The results of this work will be of great help to produce compost quickly and efficiently, to reduce the use of peat in vegetable cultivation.

Key words: Valorization of agricultural residues, Biochar, Co-composting, Organic substrates.

INTRODUCCIÓN

La producción de almácigos y plantines de hortalizas es una de las etapas más trascendentales en los sistemas de producción hortícola, ya que es donde se establecen las condiciones necesarias para la reproducción y crecimiento del cultivo. En esta etapa, se deben generar plantines de buena calidad que permitan asegurar un cultivo sano y uniforme, con rendimientos apropiados y el éxito en el proceso de trasplante. Para esto, se deben generar plantas con raíces bien formadas que sean capaces de sobrevivir, entre otras cosas, a procesos como el trasplante, además de asegurar un correcto anclaje al sustrato (Chahin, 2019).

Un aspecto de suma importancia en la producción bajo condiciones de invernadero es el medio o sustrato que se utiliza para el crecimiento de las plantas, el cual puede ser suelo mineral o sustratos orgánicos o inorgánicos (Cruz-Crespo et al., 2013). Actualmente, una proporción importante de la producción de plantines de hortalizas se realiza utilizando como sustrato orgánico la turba (*Sphagnum* sp.) mezclado con algunos materiales inorgánicos (ej., perlita y/o vermiculita), siendo este, uno de los sustratos más ampliamente utilizado por viveros debido a su lenta degradación y a sus propiedades químicas y físicas (Nocentini et al., 2021). Sin embargo, esta es una práctica altamente cuestionada en la actualidad, debido al gran impacto medio ambiental que tiene por el drenaje de humedales que se produce durante su extracción y liberación de gases de efecto invernadero, entre otros impactos a estos importantes ecosistemas altamente frágiles (Clunes et al., 2022). Se ha reportado que se extraen grandes cantidades de *Sphagnum* desde las turberas, ubicadas en humedales de zonas frías y lluviosas del planeta. Bajo este contexto, actualmente se han diseñado una serie de programas de conservación de estos ecosistemas, lo que ha llevado a optar por manejos sustentables, ya que se prevé la escasez de este material en el futuro (Quintana, 2020). Además, debido a que el costo de este sustrato es elevado para pequeños agricultores, sobre todo en el caso de aquellas mezclas de turbas importadas, muchas veces estos utilizan otros medios como suelo mineral o

arena, que por el escaso control fitosanitario pueden ocasionar importantes problemas en los almácigos (Roldán y Soto, 2005).

Por otra parte, las explotaciones agrícolas producen muchos residuos orgánicos, ya sean restos de poda, restos de cosecha, paja, orujo de uva en la industria vinífera, restos de fruta de packing, entre otros (Medina et al., 2015). Una parte de estos residuos es utilizada en prácticas agroindustriales, como parte de la base en la alimentación animal o incorporada al suelo como materia orgánica mejorando las propiedades de éste (Calabi-Floody et al., 2018). No obstante, una gran cantidad termina generando daños al medio ambiente a través de prácticas como la quema de rastrojos, o por su disposición en espacios abiertos, provocando entre otras cosas, la generación de compuestos contaminantes de aguas subterráneas, la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de material particulado y la degradación del suelo cuando los desechos son quemados (Medina et al., 2015; Ruiz et al., 2015). Por lo tanto, surge la necesidad de generar un manejo sustentable de estos residuos y la posibilidad de valorizarlos para obtener beneficios a partir de su utilización. Adicionalmente, hoy el país como parte de sus contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN) ha comprometido dentro de sus ejes de acción una Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO) lo que generará toda una serie de normativas y gobernanzas para el correcto manejo de estos (MMA, 2020).

En la actualidad, el compostaje es una tecnología ampliamente difundida por sus bajos costos y por su escasa inversión inicial, además de su efectividad en la estabilización de materia orgánica, surge como una de las alternativas más viables en la gestión de residuos orgánicos y como una potencial herramienta para la producción de sustratos orgánicos (Barthod et al., 2018). Diversos tipos de materiales han sido utilizados como insumo para producir compost y son evaluados constantemente como componentes de sustratos para la producción de plantas (Estévez-Schwarz et al., 2009; Nocentini et al., 2020). Sin embargo, el uso de compost también puede tener algunas limitantes en la generación y diseño de sustratos, y dependerá del material de base que se composte,

además de las distintas condiciones del sistema de producción. Entre sus limitantes, se ha reportado en algunos estudios una alta tasa de mineralización y una descomposición del sustrato terminado relativamente rápida, como también sus altos niveles de salinidad (Estévez-Schwarz et al., 2009). Tomando en consideración lo antes señalado, surge la necesidad de mejorar el proceso a través de distintas alternativas, siendo el uso de aditivos una de las que comienza a tener mayor importancia a nivel mundial (Bolan et al., 2012; Barthod et al., 2018). En este sentido, el biochar que es un material que se obtiene a través de pirólisis de materiales orgánicos (Downie, 2011) ha ganado interés por sus propiedades fisicoquímicas como un potencial mejorador del proceso de compostaje cuando es utilizado como aditivo (Hagenamm et al., 2018). Este material incluso podría ser una alternativa viable al uso de la turba, ya que presenta similitudes en sus propiedades, como lo son una alta porosidad, baja densidad y una alta capacidad de retención de agua (CRA) (Kern et al., 2017). No obstante, es un material de alto costo y resulta inviable en términos económicos su uso como sustrato por lo que sus mayores ventajas han sido observadas cuando forma parte de sistemas de co-compostaje con residuos agrícolas (Medina et al., 2021). Bajo este contexto, resulta de interés el estudio del co-compostaje de residuos agrícolas de distinto origen y el uso de aditivos como el biochar, con la finalidad de mejorar el proceso y el producto final de compostaje (Barthod et al., 2018) para la generación de materiales orgánicos que puedan ser utilizados en el posterior diseño de sustratos orgánicos. A partir de lo anterior se ha planteado la siguiente hipótesis y objetivos de estudio:

HIPÓTESIS

El uso del biochar como aditivo en el proceso de co-compostaje de residuos agrícolas y ganaderos afectará las propiedades fisicoquímicas y biológicas de la mezcla de residuos agropecuarios y mejora el nivel de estabilidad y madurez del producto final que hacen de este un material apto para su uso como sustrato orgánico para especies hortícolas.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del biochar como aditivo en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del co-compostaje de residuos agropecuarios y en la calidad del producto final para su empleo en el diseño de sustratos orgánicos orientados a la producción de plantines en condiciones invernadero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo 1: Determinar el efecto del biochar en las principales propiedades fisicoquímicas y biológicas durante el proceso de co-compostaje de los principales residuos agrícolas y ganaderos estudiados.

Objetivo 2: Analizar el efecto del biochar en la estabilidad y madurez de los productos finales de co-compostaje de los principales residuos agrícolas y ganaderos estudiados.

Objetivo 3: Determinar la calidad del producto final de co-compostaje de los residuos agrícolas y ganaderos con el biochar para su potencial uso en el diseño de sustratos orgánicos.

2.-MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Lugar de estudio

El ensayo se realizó bajo condiciones de invernadero. La ubicación fue en el Campus Colchagua, Universidad de O'Higgins, comuna de San Fernando. Por otro lado, las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Ecología Microbiana y Biogeoquímica de Suelos (LEMiBiS) del Instituto de Ciencias Agroalimentarias, Animales y Ambientales (ICA3) localizado igualmente en el Campus Colchagua, de la Universidad de O'Higgins, en San Fernando, región de O'Higgins.

2.2 Materiales orgánicos compostados y biochar como aditivo.

Para el ensayo principal de este estudio se utilizó como material de base para el compostaje, residuos agrícolas provenientes de distintas explotaciones agropecuarias, producción porcina y de maíz, de la región de O'Higgins. Se compostó paja (Tallo y hojas) de maíz (*Zea mays*), que en su composición es altamente rico en lignocelulosa, y que además es uno de los residuos más producidos en la región de O'Higgins, proveniente principalmente de las explotaciones de maíz para grano del sector La Gamboina, Rancagua. Por otro lado, se utilizó como residuo ganadero guano de cerdo de la industria porcina proveniente de un plantel porcino ubicado en la localidad de Chacarillas de la comuna de Placilla, material con gran contenido de agua y que en su composición presenta un alto contenido de nitrógeno y fósforo (Tovar, 2017).

Para el co-compostaje se utilizó como aditivo biochar de residuos forestales de elaboración propia. Este biochar se generó a partir de la pirolisis directa de materiales y residuos de la producción forestal como aserrines y chips de pino. Para su obtención, se llevó a cabo a una pirolisis lenta en condiciones de baja concentración de oxígeno en un sistema de doble-cámara (Figura 6 y 7 del apéndice) a temperaturas de hasta 450 °C y con

un tiempo de residencia de 4 h (Nocentini et al. 2021). Los materiales, previo a su co-compostaje, fueron caracterizados a partir de distintas propiedades fisicoquímicas (Tabla 2).

2.3 Proceso de co-compostaje y diseño experimental.

Para el co-compostaje aeróbico de materiales orgánicos, se realizaron mezclas de paja de maíz más guano de cerdo más biochar en distintas proporciones (Tabla 1) en cajas plásticas coloridas de 6 litros (Figura 1) previamente perforadas para permitir la ventilación del reactor y la difusión de los distintos gases. El ensayo se llevó a cabo bajo invernadero, no obstante, las condiciones de temperatura fueron variables y no alcanzaron las temperaturas comúnmente registradas en invernaderos (temperatura ambiental en Figura 1). El proceso de compostaje tuvo una duración de 3 meses (94 días) bajo las condiciones anteriormente señaladas. Los materiales se mezclaron manualmente para lograr una homogeneidad en cada reactor. La aireación de los reactores se realizó una vez a la semana a través de volteos manuales. Mientras que la medición de temperatura se realizó 3 veces por semana y dos veces cada día. Esta medición se realizó colocando el sensor del termómetro en el centro de la pila de compost y distintos puntos del reactor. Se aplicó riego manual con agua potable de grifo con el fin de mantener un contenido de agua constante de aproximadamente 60%. El diseño experimental fue completamente al azar, con un total de 3 tratamientos y 3 réplicas por tratamiento generando un total de 9 unidades experimentales. Los tratamientos (Figura 2 del apéndice) fueron definidos de acuerdo con valores obtenidos en la literatura para el compostaje de residuos de la industria porcina y de acuerdo con los porcentajes indicados para los contenidos de biochar (Khan et al. 2014).

Tabla 1. Tratamientos y porcentaje de materiales.

Tratamiento	Paja de maíz	Purín de cerdo	Biochar
-------------	--------------	----------------	---------

Control	50%	50%	-
CB1	45%	45%	10%
CB2	40%	40%	20%

El porcentaje de las mezclas esta presentado en v/v. Figura 2 del apéndice muestra los tratamientos.

2.4 Monitoreo del proceso de co-compostaje.

Para evaluar y monitorear la evolución del co-compostaje, se determinó la temperatura diariamente. Para esto, la temperatura se midió con un termómetro digital (Figura 5 del apéndice) con el que también se midió la temperatura ambiental. Para las mediciones, se tomaron distintas profundidades del compost y los valores fueron promediados. Para la toma de temperatura, se hizo mediciones durante la mañana (9 horas) y en las tardes (16 horas) para tener una referencia de las condiciones externas en el invernadero. Adicionalmente se realizaron mediciones de la temperatura ambiental dentro del invernadero donde se encontraban los reactores.

Por otro lado, para tener un registro más detallado de la evolución del compost, se evaluaron el pH y la conductividad eléctrica (CE) de las mezclas de compost durante el proceso. Para la CE y el pH se tamizó una muestra (2mm de tamiz) y se mezcló con cinco partes de agua (p/p). Para el pH se pesaron 5 g de sustrato seco y fue incorporado en un tubo de ensayo donde se le aplicó 25 mL de agua destilada para cumplir con la relación 1:5 (sustrato: agua). Este se debió agitar enérgicamente durante 30 s, luego se volvió a agitar de la misma forma justo antes de medir en el pH-metro previamente calibrado. La medición se realizó dos veces por muestra. Una vez terminada la medición se centrifugaron las muestras a ocho mil rpm durante 15 min. Se extrajo la solución líquida y sin sedimentos, la cual se depositó en otro tubo de ensayo para medir dos veces por muestra la conductividad eléctrica (Sadzawka et al., 2005).

Adicionalmente, se realizaron mediciones del contenido de agua. En este sentido, para conocer la dosis de riego, primero se midió el contenido de agua inicial de los materiales y los sólidos totales de estos, para con ello aplicar la cantidad de agua necesaria

para alcanzar un valor de 60% de humedad durante la totalidad del proceso. Del mismo modo, se complementó el riego a partir de su cálculo semanal por diferencia de masa entre el material seco y el material humectado.

2.5 Análisis de los productos finales de co-compostaje.

Al final del proceso, se analizaron las siguientes propiedades físicas, químicas y biológicas que daban cuenta del nivel de estabilidad, madurez y calidad del producto final.

2.5.1 Propiedades físicas.

Para el análisis de sólidos totales, se tomó una alícuota o muestra compuesta de cada tratamiento. Luego, se pesó la muestra húmeda y se secó a 70°C por un mínimo de 24 horas. Posteriormente, se pesó la muestra seca y se calculó el contenido de sólidos utilizando la siguiente fórmula (Sadzawka et al., 2005):

$$ST (\%) = \left(\frac{PS}{PH} \right) * 100$$

Donde: ST (%): Sólidos totales en porcentaje.

PS: Peso seco de la muestra a 70°C

PH: Peso fresco de la muestra

2.5.1.1 Densidad aparente

Para el análisis de la densidad aparente, en primer lugar, se tamizó una muestra de compost en un tamiz de apertura de 19 mm y con ayuda de un embudo se vertió la muestra en un vaso graduado de 1 L previamente pesado a una exactitud de 0,1 g. Después, se

dieron golpes al vaso con la muestra de manera firme tres veces contra el mesón, para posteriormente ser pesado a una exactitud de 0,1 g. Finalmente, se secó la muestra en la estufa a 70°C por 24 h para calcular los sólidos totales.

Los resultados se calcularon de la siguiente forma:

$$MS = (a - b) \times \left(\frac{ST}{100}\right)$$

Donde: MS = masa en g de la muestra seca a 70°C

a = masa en g de la muestra húmeda + vaso

b = masa en g del vaso graduado

ST = sólidos totales de la muestra.

Con este valor MS es posible calcular la densidad aparente de la siguiente manera:

$$DA \left(\frac{kg}{m^3}\right) = MS/V$$

Donde: DA = densidad aparente

MS = masa en g de la muestra seca a 70°C

V = volumen de la muestra.

2.5.1.2 Distribución del tamaño de partículas

La metodología para el cálculo de la distribución del tamaño de partículas se realizó en base a lo reportado por Sadzawka et al., (2005), donde se determinó la distribución del tamaño de partículas mediante el uso de tamices de distintas medidas, las cuales corresponden a: 4,75; 3,35; 2; 1,18; 0,6; 0,25; 0,15 mm. De estos tamices se desprenden 5 rangos, los cuales corresponden a: A= >4,75mm; B= 4,75 – 2 mm; C= 2 – 0,25; D= 0,25 – 0,15; D= <0,15. Para el análisis, se tomó una alícuota (50 g) de cada

muestra seca en la estufa a 70°C y se colocó en el tamiz de mayor apertura el cual se sitúa sobre los otros tamices que van en orden descendente de acuerdo con la apertura de sus mallas. Luego se instalaron los tamices en un equipo agitador durante 5 min. Finalmente, se pesó el material colectado en cada tamiz y se obtuvo el total para cada rango. Los resultados fueron expresados en porcentaje de tamaño de partículas por cada rango.

2.5.1.3 Capacidad de retención de agua

La medición se realizó en base a la metodología descrita por Nocentini et al., (2021) y Tello y Vega (2015), donde se pesaron 6 g de sustrato y se colocó sobre un papel de filtro (MN 650 MD, MN Macherey-Nagel, HES, Alemania) sobre un embudo. Se aplicó 20 ml de agua destilada para dejar el material saturado y se dejó filtrar por 3 horas. Luego, se extrajo el sustrato húmedo desde el papel filtro y se colocó en bandejas de aluminio para secarlas en una estufa a 70°C por 24 h. Pasado el tiempo, se pesó el suelo seco y se calculó la capacidad de retención de agua de la siguiente manera:

$$\text{CRA (\%)} = [(\text{MSA} - \text{MS}) / \text{MS}] * 100$$

Donde CRA= Capacidad de Retención de Agua, expresada en %.

MSA= masa muestra saturada, en g.

MS= masa muestra seca a 70°C ± 5°C, en g.

2.6 Análisis de propiedades químicas y biológicas de los sustratos finales.

Se analizaron las siguientes propiedades químicas y biológicas a partir de los compost terminados.

2.6.1 Materia orgánica y carbono orgánico total

Para el contenido de carbono orgánico (método modificado de Sadzawka et al., 2006) se molió una porción de la muestra seca a 70°C. Se pesaron 0,2 g y se dispuso en un matraz Erlenmeyer de 250 ml. Se añadió al matraz 10 ml de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) diluido (0,5 mol/l) y 20 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y se dejó reposar por 30 min en una campana de extracción. Posteriormente, se aplicaron 70 ml de agua destilada y las mezclas se dejaron reposar 12 h. Pasado el tiempo, se extrajeron 2 mL de la solución las que se les midió la absorbancia en el equipo Epoch2 a una frecuencia de onda de 600 nm.

Con los valores que arrojó el equipo, se calculó la concentración de carbono de la muestra con la siguiente formula.

$$\text{Carbono Orgánico (\%)} = \frac{a - b}{10 * s}$$

Donde: a= mg de C de la muestra

b= mg promedio de C en los blancos

s= masa en g de la muestra

Para el cálculo de la materia orgánica se multiplicó el valor de carbono orgánico obtenido anteriormente por un factor de conversión (1,724) de la siguiente manera:

$$\text{Materia orgánica (\%)}: \text{carbono orgánico (\%)} * 1,724$$

2.6.2 pH y Conductividad eléctrica.

Al igual que para monitorear el proceso de co-compostaje, se analizó el pH y CE para los productos finales de co-compostaje. Para la medición de pH, tal como fue señalado anteriormente se pesaron 5 gramos del sustrato que fue incorporado en un tubo de ensayo donde se le aplicó 25 ml de agua destilada para cumplir con la relación 1:5 (sustrato:agua). Posteriormente, se midió por potenciometría después de agitar y centrifugar el material. Del mismo modo, a partir del material filtrado, se hizo el análisis de CE utilizando un conductivímetro (Sadzawka et al., 2005).

2.6.3 Índice de estabilidad a través de las emisiones de CO₂ y NH₃ mediante el uso de la prueba SOLVITA®.

Para este análisis, se realizó la prueba SOLVITA® para medir tanto la liberación de dióxido de carbono como la liberación de amoníaco desde muestras húmedas al final del proceso de co-compostaje. En sistemas de co-compostaje aeróbico, la concentración de CO₂ como de NH₃ tienden a disminuir en la medida que decrece la actividad metabólica de los microorganismos, esto condicionado y como potencial consecuencia de la disminución de la fase bio-oxidativa del proceso y por un incremento en las reacciones de polimerización y condensación descritas para los materiales estabilizados y ricos en compuestos de naturaleza húmica (Khan et al., 2014). Para esto, los instrumentos utilizados fueron paletas de gel y un lector que mide a distintas amplitudes de ondas. Brevemente, se agregó una muestra de compost a los frascos hasta la marca indicada (100 mL). Luego se introdujeron paletas de gel específicas para cada medición de CO₂ y NH₃ al interior del frasco. Posteriormente, se incubaron los frascos por 4 h a 25°C, luego se extrajeron las paletas y se analizaron con el lector que de acuerdo con el color del gel mide las concentraciones de CO₂ y NH₃ que se liberaron desde el sustrato durante la incubación.

Finalmente, el lector entregó los resultados para las concentraciones de CO₂ y de NH₃. En el caso del CO₂, el método permite conocer a través del color del gel, el porcentaje de CO₂ y la concentración en ppm que emitió el sustrato. Mientras que en el caso del NH₃, el color del gel permite conocer los mg y el porcentaje de NH₃ liberado desde el sustrato. Cabe señalar que este método es ampliamente difundido y utilizado en sistemas de co-compostaje industrial por la precisión y rapidez del método.

2.6.4 Análisis de fitotoxicidad como indicador de calidad del producto final a través del índice de germinación (IG)

Para esta medición se utilizó la metodología propuesta por Zucconi et al., (1981) y Luo et al., (2017), donde se utilizaron semillas de rabanito (*Raphanus sativus*) para determinar la fitotoxicidad de los sustratos que podrían inhibir la germinación y crecimiento de esta especie. Para la medición, se prepararon dos diluciones de 1:10 (5 g de sustrato: 50 ml agua destilada) y 1:15 (3 g de sustrato: 45 ml agua destilada) en tubos de ensayo de 50 ml, los cuales fueron agitados en un agitador vortex por 1 minuto a 3000 rpm. Luego fueron centrifugadas en a 3000 rpm por 15 min. Luego, en un soporte con embudo se colocó un papel filtro donde se depositaron las diluciones para obtener los dos extractos.

Se utilizaron tres placas de Petri por tratamiento y dilución. Se aplicó 10 ml de cada dilución y se les colocó papel filtro en su interior sobre el cual se depositaron 10 semillas de rabanito. Luego se envolvieron las placas Petri en papel de aluminio y se mantuvieron a 20°C ± 5°C por 72 h. Para obtener el índice de germinación se consideró el porcentaje de germinación relativo y el crecimiento de radícula relativo, los cuales se calcularon de la siguiente manera:

$$PGR = \frac{N^{\circ} \text{ semillas germinadas en extracto}}{N^{\circ} \text{ semillas germinadas en testigo}} * 100$$

$$CRR = \frac{\textit{Longitud de radículas en extracto}}{\textit{Longitud de radículas en testigo}} * 100$$

$$IG = \frac{(PGR * CRR)}{100}$$

Donde:

PGR = porcentaje de germinación relativo (%).

CRR = Crecimiento de radícula relativo (%).

IG = índice de germinación (%).

2.7 Análisis estadístico.

Para la evaluación de las características fisicoquímicas, así como las pruebas de madurez del compost se realizó un análisis de varianza, previo al análisis de los supuestos: pruebas de hipótesis de la normalidad de residuos (Prueba de Shapiro-Wilks) y homogeneidad de varianza (Prueba de Levene), ambas considerando un 5% de significancia. En el caso de la existencia de diferencias significativas se realizó la prueba de comparación múltiple Tukey con un $p \leq 0,05$. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo en el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2020).

3.- RESULTADOS

A continuación, se muestra la caracterización inicial de los materiales base utilizados en el ensayo de co-compostaje aeróbico.

Tabla 2. Caracterización inicial de materiales utilizados en el proceso de co-compostaje y valores de referencia sugeridos por la Norma Chilena de Compostaje (NCh2880).

Material	Biochar	Paja	Guano	Control*	NCh2880**
pH	9,15	8,59	8,14	8,53	5,0-8,5
CE (mS/cm)	0,517	0,974	1,048	2,33	<3,00
Contenido de agua (%)	49,8	21,2	69,2	58,8	30-45
Sólidos totales (%)	50,2	78,8	30,8	41,2	55-70
MO (%)	23,4	69,9	73		>20
COT (%)	13,6	40,5	42,3		

*Mezcla de partes iguales en volumen de paja de maíz y guano de cerdo. **Parámetros aceptados para los materiales base para un compost clase A según la NCh2880. CE: Conductividad Eléctrica; MO: Materia Orgánica; COT: Carbono Orgánico Total.

La caracterización inicial de los residuos orgánicos agropecuarios utilizados como materia prima para la elaboración del compost mostró que el pH en todos los materiales que se utilizaron en el proceso son alcalinos, siendo el biochar de residuos forestales el que evidenció un mayor pH inicial. Por otro lado, la caracterización inicial sugiere que la conductividad eléctrica se encuentra dentro del rango aceptado por la NCh2880, la cual para un compost clase A debe ser igual o menor a 3 mS/cm.

En cuanto al contenido de agua, que es inversamente proporcional al contenido de sólidos totales, tanto el biochar y como el guano, tienen niveles altos. Es importante señalar que al final del proceso de pirolisis a partir del cual se produjo biochar, el material fue humectado de acuerdo con las distintas recomendaciones de la literatura (Nocentini et al., 2021). Contrariamente, la paja y cañas de maíz mostraron un porcentaje de agua bajo,

aun así, la mezcla base que consiste en 50% de paja y 50% guano posee un contenido de agua superior a lo aceptado (NCh2880) pero apropiado para iniciar el proceso.

Para el caso de la materia orgánica, esta se relaciona directamente con el carbono orgánico total. La paja y el guano que son residuos orgánicos frescos poseen niveles altos de CO y por tanto de MO, pero fue el biochar el que presentó el menor contenido de MO con un nivel levemente superior a lo sugerido por la NCh2880. Sin embargo, el biochar fue utilizado solo como aditivo y estructurante en bajas proporciones.

3.1 Monitoreo del proceso

3.1.1 Temperatura de las pilas de compost durante el proceso de co-compostaje.

Las pilas de compost mostraron variaciones en cuanto a la temperatura durante todo el proceso (Figura 1). Hasta el día 21 desde el inicio del proceso de co-compostaje, la temperatura fue inferior a los 20°C. Desde este punto comenzó a aumentar registrando dos puntos máximos de temperatura, siendo en el segundo pico donde se registraron valores de temperatura puntuales de 40°C en el día 58. Luego, en el día 74 la temperatura comenzó a bajar hasta los 30°C y se mantuvo relativamente constante hasta el final del proceso.

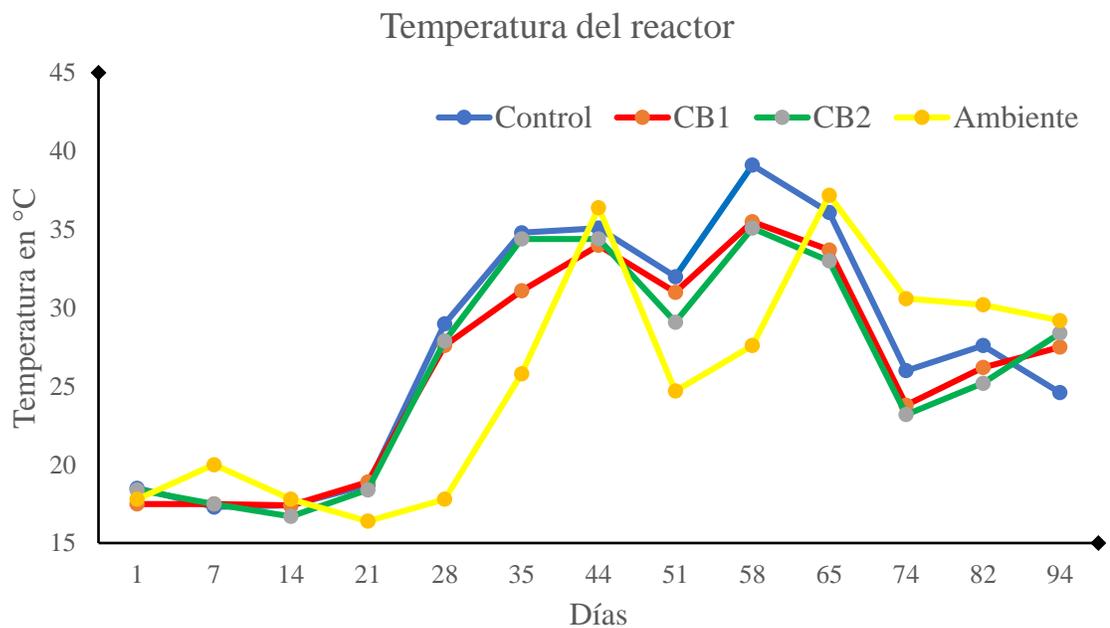


Figura 1. Temperatura de las pilas de compost durante el proceso de co-compostaje. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar). La temperatura se analizó tanto en horario am como pm y los valores corresponden a las mediciones de la tarde (16 h).

3.1.2 pH durante el proceso de co-compostaje

En la Figura 2 se muestra la evolución del pH durante el proceso de co-compostaje, donde se puede apreciar una acidificación del compost en las primeras semanas alcanzando un pH cercano a 7, para luego subir y llegar a valores más cercanos a 8. El pH final es menor que el inicial, donde de un pH de 8,5 aproximado al inicio, bajó a pH 8 en los tres tratamientos al final del co-compostaje. Para el día 94 el tratamiento control presentó un pH de 7,9, a diferencia de los tratamientos con biochar (CB1 y CB2) que ambos presentaron un pH de 7,5.

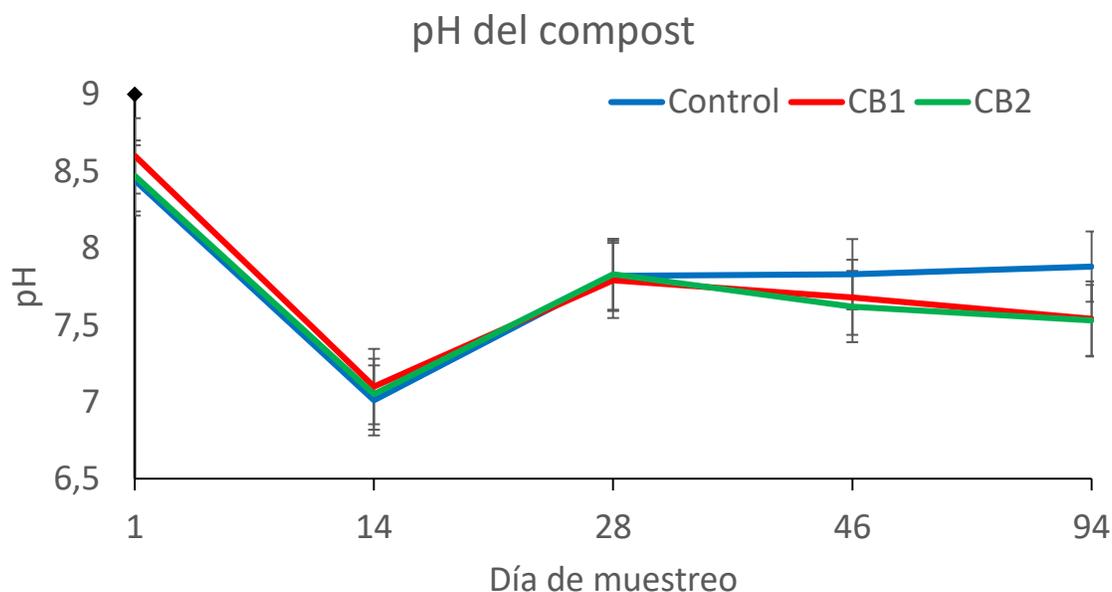


Figura 2. Variación en el pH del compost durante el proceso de co-compostaje. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

3.1.3 Conductividad eléctrica durante el proceso de co-compostaje

En la Figura 3 se muestra la curva de evolución de la conductividad eléctrica durante el proceso de co-compostaje medida en mS/cm. Se aprecia una disminución de la CE al comienzo del co-compostaje (menor a 1 mS/cm) respecto de los valores obtenidos de la caracterización de los materiales base. Luego, al final del proceso de co-compostaje se aprecia un alza en este valor donde los tratamientos CB1 y CB2 alcanzaron una CE de 2,19 mS/cm y 1,88 mS/cm respectivamente. Por otra parte, el tratamiento Control alcanzó un valor de 3,46 mS/cm siendo este el que tiene la CE más elevada. A pesar del aumento de la CE, estos valores se encuentran por debajo del límite que exige la NCh2880, de 5 mS/cm para un compost de clase A.

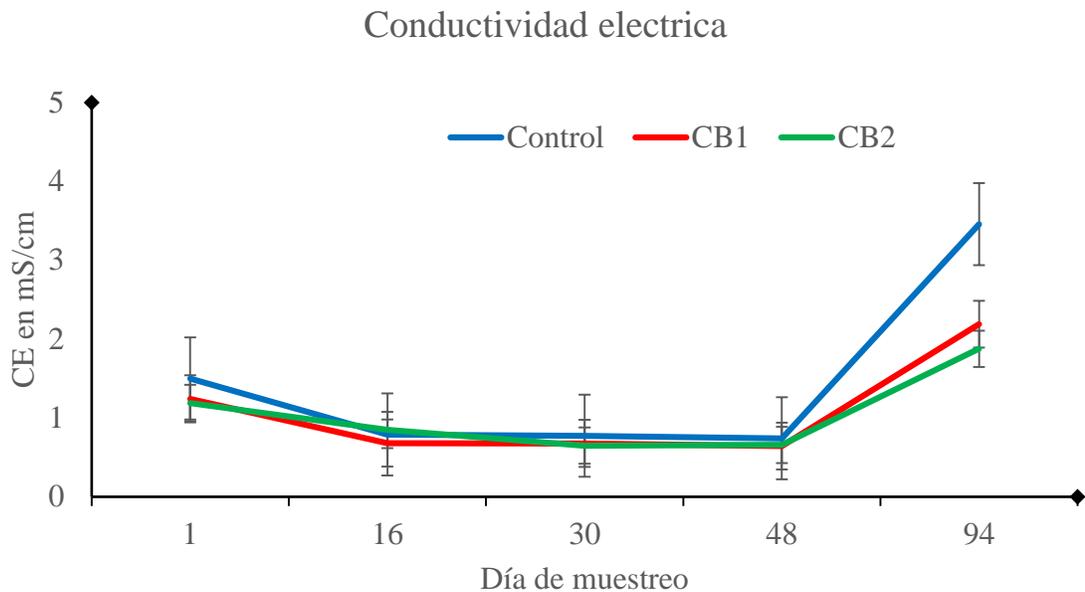


Figura 3. Variación de la conductividad eléctrica durante el proceso de co-compostaje. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

3.2 Caracterización física de los productos finales del proceso de co-compostaje.

3.2.1 Distribución del tamaño de partículas

Para determinar la distribución de partículas se distribuyó el material en distintos rangos como lo muestra la Tabla 3. En esta, se observan 5 grupos de diferentes rangos de tamaño de las partículas, lo cual permite conocer dentro de que rango se encuentra la mayor cantidad de material de cada tratamiento. Según Ansorena (1994), Abad et al., (1993) y Rodríguez (2013), el rango óptimo para un sustrato orgánico es el C (2-0,25 mm), el cual tiene la mejor relación de macroporos y microporos.

Tabla 3. Rango de apertura de las fracciones de tamaño de partículas.

Fracción de tamices	Rango (mm)	Número de tamiz
A	> 4,75	4
B	4,75 – 2	6 – 10
C	2 – 0,25	16 – 30
D	0,25 – 0,15	60 – 100
E	<0,15	–

Tabla 4. Distribución del tamaño de partículas en los distintos tratamientos al término del proceso de co-compostaje.

Tratamiento	Rangos de tamaño de partículas				
	A (>4,75)	B (4,75-2)	C (2-0,25)	D (0,25-0,15)	E (<0,15)
Control	41*	31	23	5	-
CB1	30	35*	30	5	-
CB2	28	28	37*	6	1
	%	%	%	%	%

* mayor porcentaje de partículas por rango. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

De la Tabla 4 se puede sugerir posibles diferencias entre los tratamientos en el día 94. De acuerdo con esto, se aprecia que el tratamiento control tiene una mayor tendencia a presentar su mayor proporción de partículas en el rango A (>4,75 mm), el de mayor tamaño de partículas. El tratamiento CB1 presenta la mayor cantidad de partículas en el rango B y el tratamiento CB2 tiene una mayor cantidad de partículas en el rango C que corresponde a partículas de tamaño entre 2 a 0,25 mm.

3.2.2 Densidad aparente

Tal como se puede observar en la Tabla 5, la densidad aparente de los distintos tratamientos oscila entre los 139,4 kg/m³ y los 185,9 kg/m³. Siendo el tratamiento CB2 el que presentó la mayor densidad aparente, seguido del tratamiento CB1 y del tratamiento Control.

Tabla 5. Densidad aparente de los distintos tratamientos al término del proceso de co-compostaje.

Tratamiento	Agua (%)	Sólidos totales (%)	Densidad aparente (kg/m ³)
Control	40,5	59,5	152,2
CB1	60	40	139,4
CB2	58,9	41,1	184,9

Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

3.2.3 Capacidad de retención de agua (CRA).

Como se puede observar en la Tabla 6, la capacidad de retención de agua mostró valores elevados con diferencias significativas entre los tres tratamientos. En el caso del tratamiento CB2, este presentó el mayor CRA, con un valor de 479,2%. Mientras que CB1 presentó un CRA de 418,5% y el Control que tuvo el menor CRA con 363,5%.

Tabla 6. Análisis de la varianza del % de la Capacidad de Retención de Agua (CRA) del sustrato final.

Tratamiento	CRA %
Control	363,5 c
CB1	418,5 b
CB2	479,2 a
Significancia	***

Valores corresponden a medias. Letras distintas en forma vertical indican diferencia significativa entre los tratamientos. Nivel de significancia: *** p = 5%. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

3.3 Caracterización química y biológica de los productos finales del proceso de compostaje.

3.3.1 Materia orgánica y carbono orgánico total.

En la Tabla 7 se puede apreciar los valores de Carbono Orgánico Total (COT, %) y Materia Orgánica (MO, %) en los distintos tratamientos. Donde no hubo diferencias estadísticamente significativas, y los valores de COT se varían entre 27,5% y 31,3%. Mientras que en el caso de la materia orgánica los valores se encuentran entre 47,4% y 53,9%.

Tabla 7. Materia orgánica (MO) y Carbono orgánico total (COT) del sustrato final.

Tratamiento	COT %	MO %
Control	31,3	53,9
CB1	28,3	48,9
CB2	27,5	47,4
Significancia	n.s.	n.s.

Valores corresponden a medias. Letras distintas en forma vertical indican diferencia significativa entre los tratamientos. Nivel de significancia: *** p = 5%. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

3.3.2 pH y Conductividad eléctrica del compost final

En la Tabla 8 se muestran los valores de pH y CE al final del proceso de co-compostaje, donde se aprecia una diferencia estadísticamente significativa entre el tratamiento Control que tuvo un mayor pH y CE que los tratamientos CB1 Y CB2, los cuales no presentan diferencia entre ellos.

Tabla 8. Análisis de la varianza para los parámetros pH y CE en los distintos tratamientos al término del proceso de co-compostaje.

Tratamiento	pH	CE
		(mS/cm)
Control	7,93 a	3,46 a
CB1	7,53 b	2,19 b
CB2	7,50 b	1,88 b
Significancia	***	***

Valores corresponden a medias. Letras distintas en forma vertical indican diferencia significativa entre los tratamientos. Nivel de significancia: *** $p = 5\%$. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

3.3.3 Análisis de estabilidad a través de la prueba SOLVITA®

Si bien la prueba SOLVITA® permitió tener una referencia de la evolución del proceso en cada reactor, se dejó como parte de la caracterización de los productos finales porque a partir de esta información se detuvo el proceso con los antecedentes obtenidos. En las Figuras 4 y 5 se pueden ver los resultados para la prueba SOLVITA®, el cual mide la respiración y estabilidad del compost como se ha mencionado anteriormente. Se aprecia que la emisión de CO₂ (Figura 4) aumentó en los días 28 y 94 respecto del día 1. El primer día, los tratamientos tuvieron niveles de emisión similares. Para el día 28 ambos tratamientos con biochar tuvieron el mismo porcentaje de emisión de CO₂, mientras que el tratamiento control sin biochar tuvo el porcentaje de emisión más alto, con un 6% de CO₂ en relación con el 2,89% de CO₂ en los tratamientos con biochar. Cabe mencionar

que en el día 28 se observó micelio en las pilas de compost (Figura 3, anexo), lo que significa una mayor presencia de microorganismos.

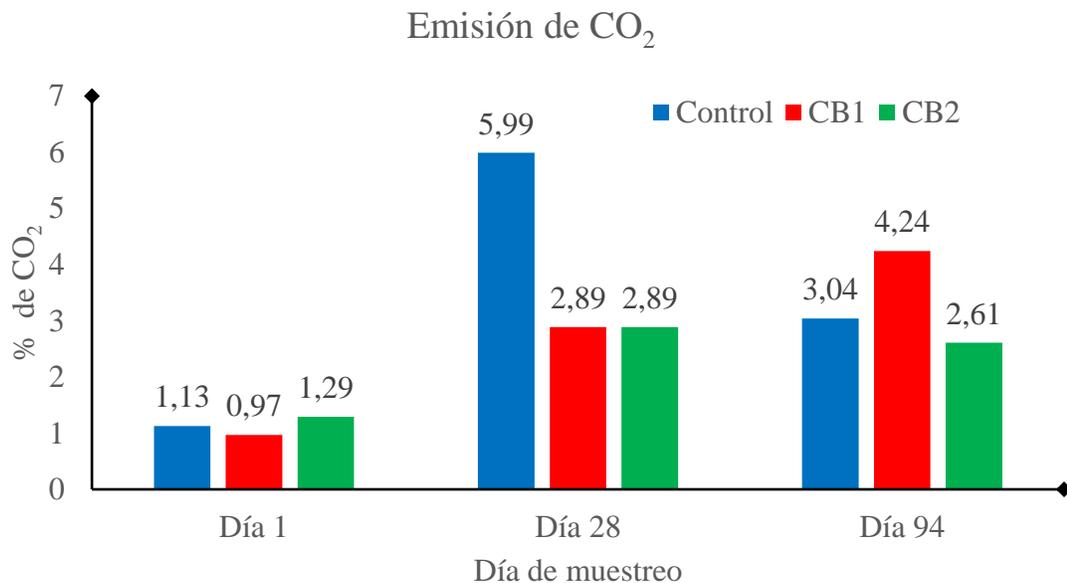


Figura 4. Análisis SOLVITA® para la emisión de CO₂. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

En cuanto a la emisión de NH₃ (Figura 5), este disminuyó conforme avanzó el proceso de co-compostaje, siendo nula la emisión al día 94 para todos los tratamientos. Solo el primer día se puede sugerir diferencias (no estadística) entre los tratamientos, donde el tratamiento CB2 emitió 0,75 mg de NH₃ durante la incubación, mientras que los tratamientos Control y CB1 emitieron 1,03 y 1,08 mg de NH₃ respectivamente.

Emisión de NH₃

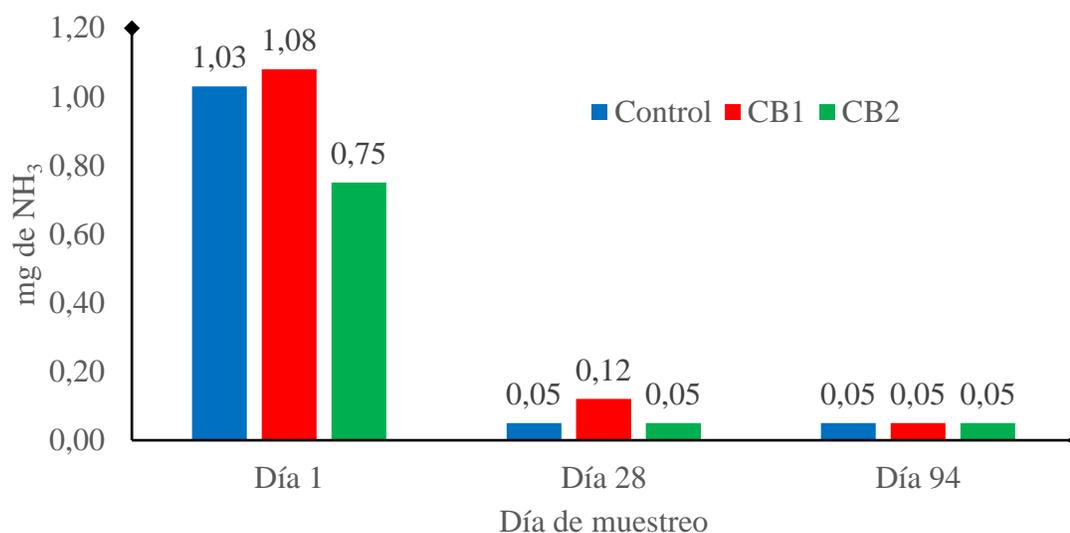


Figura 5. Análisis SOLVITA® para la emisión de NH₃. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

3.3.4 Análisis de la fitotoxicidad a partir del índice de germinación (IG).

En la Figura 6 se observan los resultados de fitotoxicidad evaluado en semillas de rabanito (*Raphanus sativus*) en dos diluciones (1:10 y 1:15) de un extracto del compost final, a excepción del testigo, que representa la germinación de las semillas en agua destilada pura. Se aprecia en el gráfico que todos los tratamientos, a excepción de CB1 en la dilución 1:10, tuvieron un índice de germinación superior al testigo. Siendo el tratamiento CB2 en ambas diluciones el que presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) respecto de CB1 y Control (Tabla 9).

Análisis de fitotoxicidad

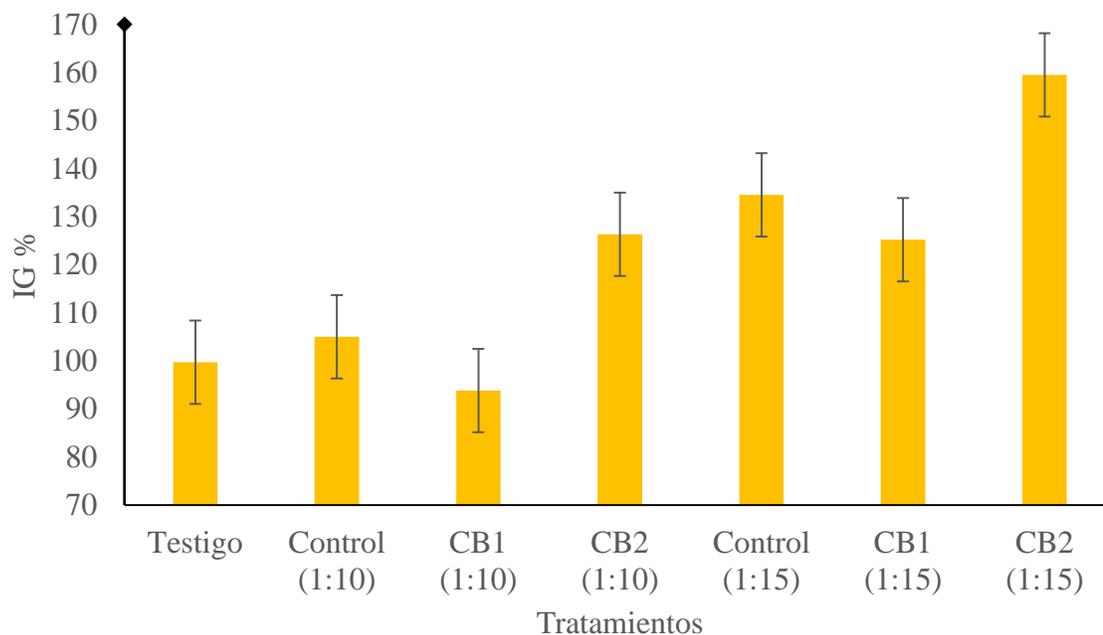


Figura 6. Índice de germinación para semillas de rabanito. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

Tabla 9. Índice de germinación en porcentaje de dos diluciones (1:10 y 1:15) para los distintos tratamientos al final del proceso de co-compostaje.

Tratamiento	IG 1:10	IG 1:15
Control	105,0 b	134,5 b
CB1	93,8 b	125,2 b
CB2	126,4 a	159,5 a
Significancia	***	***

Valores corresponden a medias. Letras distintas en forma vertical indican diferencia significativa entre los tratamientos. Nivel de significancia: *** p = 5%. Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar)

4.- DISCUSIÓN

4.1 La caracterización inicial y sus implicancias.

La caracterización fisicoquímica de los materiales a compostar es importante para tener una idea del comportamiento que tendrá el reactor durante el proceso de co-compostaje y del sustrato final. Además, cuando los valores son extremos y se alejan del rango sugerido se pueden tomar decisiones para modificar esos valores para que se ajusten a los rangos de norma (Porras, 2011).

En este sentido y en base (Tabla 2) a los resultados observados, en el caso del pH, solo el guano y la mezcla base presentan un pH dentro de los rangos sugeridos por la NCh2880, mientras que la paja presentó un valor levemente superior. Para el caso del biochar, este presentó el nivel más alto con un pH de 9,15. Aun así, debido a la acción de los microorganismos estos valores pueden cambiar durante la descomposición en el proceso de co-compostaje (Sánchez-Monedero et al., 2001; Wu et al., 2000). En el caso de la conductividad eléctrica, todos los materiales base presentaron valores bajos, siendo el caso de la mezcla base la que presentó un valor de 2,33 mS/cm, lo cual aún se mantiene como un valor aceptable para un material a compostar. En cuanto al contenido de agua, la mezcla presentó un contenido de casi 60%, lo cual es un valor alto según la NCh2880. Pero este valor es de gran variabilidad, ya que puede disminuir si se deja el material secando. A pesar de esto, para iniciar el proceso de co-compostaje se requiere de un porcentaje de agua del 60% (Damián, 2018; Bueno et al., 2008; Porras, 2011), por lo que la mezcla base tiene un valor cercano a este y la aplicación de agua fue menor de acuerdo con los cálculos obtenidos. El contenido de CO y por tanto de MO mostró una tendencia distinta entre los tratamientos, donde la paja y el guano que son materiales frescos presentaron valores de alrededor de 70% para MO, ya que son residuos frescos que aún no han tenido un proceso donde se libere el carbono de sus moléculas en forma de CO₂. Así mismo, Tovar (2017) muestra valores similares en su estudio, donde el guano de cerdo tiene 70% de materia orgánica. Por otro lado, el biochar presentó un valor mucho menor

a los otros materiales, de solo 23,4% similar a lo registrado por Trujillo et al., (2019), donde analizaron biochar a partir de residuos avícolas. Mientras que Blok et al., (2017) señala que el biochar que produjo a partir de madera presentó niveles de materia orgánica cercano a 70%. Estos datos serán corroborados a través de un set de análisis elementales que no pudieron ser llevados a cabo durante el desarrollo de esta tesina.

4.2 Monitoreo del proceso y cambios en los reactores de compost

En el caso de la temperatura, en la Figura 1 se puede observar su evolución, donde las temperaturas dentro de las pilas de compost no superaron los 20°C durante las primeras semanas. Luego de esta etapa la temperatura comenzó a aumentar, llegando a un máximo puntual de 39,4° C la cual sería la fase termófila (Contardi y de Errasti, 2013; Bohórquez, 2019). Los bajos registros de temperatura en los reactores puede ser consecuencia de que las pilas o reactores de compost fueron de bajo volumen y por lo tanto su temperatura interna fue altamente influenciada por la temperatura ambiental que durante los meses de invierno llegó a temperatura bajo 8°C dentro del invernadero. Es así como no se logró la temperatura que recomiendan distintos autores para poder eliminar la mayor cantidad de patógenos del sustrato. La NCh2880 recomienda temperaturas sobre los 55°C por al menos tres días seguidos. Mientras que Pace et al., (1995), indica que la etapa termófila necesaria en un proceso de co-compostaje se alcanza cuando las pilas de compost superan los 40°C, ya que en este punto debería comenzar la pasteurización, donde la población de agentes patógenos presentes en el compost comienza a disminuir. No obstante, que no exista una fase termófila no es indicador de que no haya un proceso de descomposición activo durante el proceso (Calabi-Floody et al., 2019).

Para el caso de la evolución del pH observado en la Figura 2, esta siguió una curva descrita por algunos autores, la cual se considera una curva común en el proceso de compostaje (Bueno et al., 2008). Esta curva se debe a que en un principio debido a la

rápida degradación de la materia orgánica más lábil (menos estable) como azúcares solubles y aminoácidos, se generan distintos ácidos orgánicos que disminuyen el pH del sustrato (ej. ácido málico). Luego, se evidenció una fase en la que estos ácidos orgánicos generados pudieron ser descompuestos por los microorganismos, lo cual eleva el pH nuevamente (Sánchez-Monedero et al., 2001; Wu et al., 2000). Finalmente, el pH del compost tiende a la neutralidad debido a la generación de sustancias húmicas que tienen efecto tampón en el sustrato final (Bueno et al., 2008).

En el caso de la conductividad eléctrica (CE), se puede apreciar que los tratamientos CB1 y CB2 presentan diferencias significativas respecto del tratamiento Control, el cual tuvo una CE superior a los otros tratamientos. Según la NCh2880, la conductividad debe ser menor a 5 mS/cm, lo cual se cumple en los tres tratamientos, donde el control tiene una CE de 3,46 y el CB2 una CE de 1,88. De la Figura 3 se puede apreciar que al principio del proceso de co-compostaje la CE disminuyó en un pequeño rango. Esto se puede deber por la lixiviación de las sales producto del riego en todas las pilas de compost (Bueno et al., 2008).

4.3 Análisis de las principales propiedades del compost terminado.

4.3.1 Propiedades físicas

En relación con la distribución de partículas mostrada en la Tabla 4, se puede ver que el tratamiento CB2 fue el que tuvo la mayor proporción de partículas en el rango C (2 – 0,25), el cual según Abad et al., (1993) y Ansorena (1994) es el rango óptimo de un sustrato para permitir un buen crecimiento radical de las plantas. Por otro lado, el tratamiento Control tuvo una mayor proporción de partículas en el rango A, el cual es el rango que contempla partículas de tamaño superior a 4,75mm. Esta distribución de

partículas se explica en ambos casos por la presencia o ausencia de biochar en los tratamientos, ya que este permite una mayor disgregación de las partículas, al ser un material fino (partículas pequeñas), que aporta a que la distribución se encuentre en los rangos de menor tamaño de partículas (Kaudal et al., 2016).

Respecto a los resultados de densidad aparente observados en la Tabla 5, todos los tratamientos tuvieron una densidad aparente baja, lo cual es ideal en un compost orgánico y para el diseño de sustratos orgánicos de interés agrícola. Según Abad et al., (1993). La densidad aparente de un sustrato orgánico debe ser menor a 400 kg/m^3 . Esto se cumple para los tres tratamientos. Por lo tanto, las ventajas de una densidad aparente baja en el sustrato es que facilita el transporte y el trabajo con el material (Ilbay, 2017). Además, Kaudal et al., (2016) indica que una baja densidad aparente limita la compactación del sustrato.

En lo que respecta a la capacidad de retención de agua (CRA), según Cruz-Crepeo et al., (2013), la CRA se relaciona con el tamaño de partículas, donde un menor tamaño de partículas permite una mayor CRA. Esto explicaría los resultados obtenidos que se presentan en la Tabla 6 y 10, donde fue el tratamiento CB2 el que tuvo la mejor CRA, seguido de CB1 y Control con la menor CRA. Estos aspectos son igualmente relevantes para el diseño de sustratos orgánicos, permitiendo hacer un uso eficiente del agua y en la aplicación de fertilizantes durante la producción de plantines producidos en viveros (Nocentini et al., 2021).

4.3.2 Propiedades químicas y biológicas del compost final

En la Tabla 7 se puede apreciar el contenido final de Materia orgánica (MO) y Carbono Orgánico Total (COT), donde no se aprecian diferencias significativas entre los tratamientos. Aún así, todos los tratamientos están dentro de lo aceptado y sugerido por la NCh2880, que indica que el contenido de MO en compost debe ser superior a 25%. Por otro lado, Abad et al., (1993) indica que un sustrato orgánico para la producción de plantines debe tener un porcentaje de MO superior a 80%, lo cual no se logra en ningún tratamiento, no obstante, por sus características de interés si podrían ser parte en combinaciones con otros materiales orgánicos.

Respecto al pH final del compost (Tabla 8), se observó una diferencia significativa entre los tratamientos, donde el tratamiento Control tuvo diferencia respecto de los tratamientos CB1 y CB2. Esto se puede deber a la adición de Biochar en los tratamientos CB1 Y CB2, material que actuaría de buffer para este parámetro (Blok et al., 2017). Cabe recalcar que el pH del Control fue de 7,9, mientras que en los tratamientos con Biochar fue de 7,5 en ambos casos. Según la norma NCh2880, son estos dos últimos tratamientos quienes poseen un pH recomendable (NCh2880). Mientras que Bueno et al., (2008), indica que un pH final superior a 7,5 es producto de una buena descomposición. Por otro lado, para el final del proceso de co-compostaje la CE aumentó considerablemente. Esto puede deberse a que se produjo la mineralización de la materia orgánica, lo cual aumenta la cantidad de nutrientes en el sustrato (Bueno et al., 2008; Sánchez-Monedero et al., 2001) y modifica el contenido de sales.

4.3.2.1 Indicadores de estabilidad y calidad de los productos finales de co-compostaje.

En las Figuras 4 y 5 se puede observar la evolución de la respiración (SOLVITA®) de los tratamientos como dato puntual, donde por la acción de los microorganismos se pasó de emitir 1% de CO₂ en el día 1 a emitir hasta 6% de CO₂ para el caso del control en el día 28. Esto se puede explicar a que en este momento comenzó a aumentar la temperatura en los reactores, lo cual significa una mayor actividad microbiana que está descomponiendo la materia orgánica (Khan et al., 2014). Así también se explican los cambios de pH y CE mencionados anteriormente, donde muestran que hubo un cambio en la actividad microbiana de los reactores. En el caso del NH₃, se pasó de 1 mg de NH₃ al primer día a una emisión casi nula al día 28 y el día 94. Según Khan et al., (2014), esto sucede cuando las temperaturas en el reactor son bajas y hay altos contenidos de agua que impiden la volatilización de este, además de promover la nitrificación de NH₃.

En cuanto al índice de germinación (fitotoxicidad), se aprecia que en todos los tratamientos en ambas diluciones el índice de germinación (IG) de las semillas de rabanito supera el 80% que Emimo y Warman (2004) establecen como valor límite de fitotoxicidad. donde un IG superior a 80% no representa toxicidad para las plantas. Por otra parte, la Norma Chilena NCh2880 sugiere que el índice de germinación debe ser superior al 90%, donde todos los tratamientos en todas las diluciones presentan un índice de germinación mayor al establecido. Algunas sustancias que pueden generar toxicidad en las plantas son el NH₃, el cual se produce por la descomposición de algunas proteínas de la materia orgánica, además de la producción de ácidos orgánicos como el ácido acético (DeVleeschauwer et al., 1981; Selim et al., 2012). De acuerdo con lo visto en la prueba SOLVITA®, la emisión de NH₃ disminuyó conforme avanzó el proceso de co-compostaje, lo cual explicaría el elevado índice de germinación en todos los tratamientos. Por otra parte, el tratamiento que dio mejores resultados fue el CB2 para las distintas pruebas fisicoquímicas y biológicas, esto se puede deber a que este sustrato posee un 20% de biochar el cual permite capturar las posibles moléculas de NH₃ que emiten los microorganismos durante la descomposición de la materia orgánica (Khan et al., 2014). Cabe recalcar que se utilizaron las diluciones 1:10 y 1:15 para simular una mezcla de este sustrato con otros, ya sean minerales u orgánicos. A partir de lo anterior, se sugiere seguir

estudiando los posibles mecanismos implicados en la transformación de los materiales y evaluar su potencial como sustrato orgánico en la producción hortícola.

CONCLUSIÓN

Tomando en cuenta el análisis de los resultados de las propiedades físicas, químicas y de calidad de los sustratos generados, hubo diferencias significativas entre los tratamientos desde el inicio del proceso hasta el término de este. Por ende, se concluye que es posible confirmar la hipótesis planteada, ya que el uso de biochar como aditivo influyó cambios en las propiedades estudiadas, entregando buenos resultados tanto en el proceso de co-compostaje como en el sustrato final. Esto se puede distinguir con el tratamiento CB2, mezcla base de compost con 20% de biochar, el cual obtuvo los mejores resultados entre los tratamientos para los parámetros de estabilidad y calidad final del compost. En este sentido, considerando que el tratamiento mostró diferencias significativas tanto en los parámetros químicos (pH y conductividad eléctrica), físicos (capacidad de retención de agua) y de calidad (fitotoxicidad) resulta un efecto de interés por parte de este aditivo en sistemas aeróbicos. Es importante hacer mención al parámetro de fitotoxicidad por su gran importancia, el cual indica la calidad y madurez del sustrato, donde nuevamente el biochar podría jugar un rol fundamental en su capacidad de retener sustancias tóxicas que pueden presentar problemas para el óptimo desarrollo de las hortalizas. Por ello, se propone el uso de biochar como un buen aditivo en el proceso de co-compostaje, permitiendo así un manejo óptimo de los residuos agropecuarios y la generación de un sustrato orgánico que podría disminuir el uso de la turba en la producción de hortalizas de vivero. Es así, como este estudio abre el camino para nuevas investigaciones que puedan enfocar su trabajo en la gestión y el manejo de residuos agropecuarios como en el efecto que puede tener el uso de estos sustratos en la producción y manejo de hortalizas en vivero.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M., Martínez, M., Martínez, J., y Martínez, P. (1993). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. In I Jornadas de Sustratos (pp. 141-154). SECH.
- Ansorena, J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 172p.
- Barthod, J., Rumpel, C. y Dignac, MF. (2018). Compostaje con aditivos para mejorar enmiendas orgánicas. Una revisión. *Agron. Sostener. Dev.* 38, 17
- Blok, C., Van der Salm, C., Hofland-Zijlstra, J., Streminska, M., Eveleens, B., Regelink, I., ... & Visser, R. (2017). Biochar for horticultural rooting media improvement: evaluation of biochar from gasification and slow pyrolysis. *Agronomy*, 7(1), 6.
- Bohórquez Santana, W. (2019). El proceso de compostaje (No. 1). Universidad de la Salle.
- Bolan, N. S., Kunhikrishnan, A., Choppala, G. K., Thangarajan, R., & Chung, J. W. (2012). Stabilization of carbon in composts and biochars in relation to carbon sequestration and soil fertility. *Science of the Total Environment*, 424, 264-270.
- Bueno, P., Díaz, M., & Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. J. Moreno. (Ed.), *Compostaje*, 93-109.
- Calabi-Floody, M., Medina, J., Rumpel, C., Condrón, L. M., Hernández, M., Dumont, M., & de La Luz Mora, M. (2018). Smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture. *Advances in agronomy*, 147, 119-157.
- Calabi-Floody, M., Medina, J., Suazo, J., Ordiqueo, M., Aponte, H., Mora, M. D. L. L., & Rumpel, C. (2019). Optimization of wheat straw co-composting for carrier material development. *Waste Management*, 98, 37-49.
- Chahin, G., Riquelme, I., & Díaz, P. (2019). Producción de plantines de hortalizas. Temuco: INIA.

Contardi, L. T., & De Errasti, A. (2013, May). Evolución de la temperatura en pilas de compostaje de residuos agroforestales. In VII Congreso de Medio Ambiente.

Clunes, J., Valle, S., Dörner, J., Campos, M., Medina, J., Zuern, S., Lagos, L. 2022. Changes in Soil Quality of an Urban Wetland as a Result of Anthropogenic Disturbance. *Land* 11, 394

Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, A., Sandoval-Villa, M., Bugarín-Montoya, R., Robles-Bermúdez, A., & Juárez-López, P. (2013). Sustratos en la horticultura. *CONACYT. Revista Bio Ciencias*, 2(2), 17-26.

Di Rienzo, J., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Walter Robledo, C. (2010). Infostat: software para análisis estadístico.

Damián, L. N. (2018). Aplicación de tres tratamientos aceleradores para la elaboración de compost de residuos del Mercado Los Cedros, Distrito de Chorrillos, 2018.

DeVleeschauwer, D., Verdonck, O., Van Assche, P., (1981). Phytotoxicity of refuse compost. *Biocycle* 22 (1), 44–46.

Downie, A. (2011). *Biochar Production and Use: Environmental Risks and Rewards*. Sydney: School of Materials Science and Engineering, The University of New South Wales.

Emino, E., Warman, P. (2004). Biological Assay for Compost Quality. *Compost Science and Utilization*, vol. 12, nro. 4, 342-348.

Estévez-Schwarz, I., Seoane, S., Núñez, A., & López-Mosquera, M. E. (2009). Characterization and evaluation of compost utilized as ornamental plant substrate. *Compost science & utilization*, 17(4), 210-219.

Hagemann, N., Subdiaga, E., Orsetti, S., de la Rosa, J. M., Knicker, H., Schmidt, H. P., & Behrens, S. (2018). Effect of biochar amendment on compost organic matter composition following aerobic composting of manure. *Science of the total environment*, 613, 20-29.

Ilbay, L. (2012). Evaluación de sustratos orgánicos para la producción de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* Var. Itálica). Ambato, Ecuador.

Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A., & Weatherley, A. (2016). An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. *Biomass and Bioenergy*, 84, 49-58.

Kern, J., Tammeorg, P., Shanskiy, M., Sakrabani, R., Knicker, H., Kammann, C., Bruno, G. (2017). Synergistic use of peat and charred material in growing media – an option to reduce the pressure on peatlands? *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 160-174.

Khan, N., Clark, I., Sánchez-Monedero, M. A., Shea, S., Meier, S., & Bolan, N. (2014). Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. *Bioresource technology*, 168, 245-251.

Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G., & Zhang, D. (2018). Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*, 71, 109-114.

Medina, J., Calabi-Floody, M., Aponte, H., Santander, C., Paneque, M., Meier, S., Panettieri, M., Cornejo, P., Borie, F., Knicker, H. (2021). Utilization of inorganic nanoparticles and biochar as additives of agricultural waste composting: Effects of end-products on plant growth, C and nutrient stock in soils from a Mediterranean región. *Agronomy* 11, 767.

Medina, J., Monreal, C., Barea, J., Arriagada, C., Borie, F., & Cornejo, P. (2015). Crop residue stabilization and application to agricultural and degraded soils: A review. Elsevier, 41-54.

MMA (2020). Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2040. <https://economiecircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/03/Estrategia-Nacional-de-Residuos-Organicos-Chile-2040.pdf>

- NCh2880. (2004). Norma Chilena Oficial: Compost-Clasificación y requisitos.
- Nocentini, M., Panettieri, M., García, J., Mastrodonato, G., Knicker, H. (2021). Recycling pyrolyzed organic waste from plant nurseries, rice production and shrimp industry as peat substitute in potting substrates. *Journal of environmental management*, Vol 277, 111436.
- Porras, S. A. (2011). Producción de compost a partir de residuos sólidos de una planta de celulosa.
- Pace, M. G., Miller, B. E., & Farrell-Poe, K. L. (1995). *The composting process*.
- Quintana, G. (2020, 26 agosto). Chiloé está perdiendo sus más importantes reservorios de agua dulce. *Diario UACH*. <https://diario.uach.cl/chiloe-esta-perdiendo-sus-mas-importantes-reservorios-de-agua-dulce/>
- Rodríguez, D. (2013). Evaluación de sustratos orgánicos alternativos en la producción de pepino (*Cucumis sativus L.*) en invernadero. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT.
- Roldán, G. Q., & Soto, C. M. (2005). Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía mesoamericana*, 16(2), 171-183.
- Ruiz, C., Wolff, M., & Claret, M. (2015). Rastrojos de cultivos anuales y residuos forestales. En C. Ruiz, *Rastrojos de cultivos y residuos forestales* (págs. 10-29). Chillan: INIA.
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., & Mora, M. (2005). *Métodos de análisis de compost*. Centro Regional de Investigación La Platina, Serie No34, Santiago, Chile. 142p.
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H., & Neaman, A. (2006). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Serie actas INIA, 163.
- Sánchez-Monedero M. A., Roig A., Paredes C. Bernal M. P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Biores. Technol.*, 78 (3): 301-308.

Selim, S. M., Zayed, M. S., & Atta, H. M. (2012). Evaluation of phytotoxicity of compost during composting process. *Nature and science*, 10(2), 69-77.

Tello, L. D., & Vega, R. A. (2015). Metodologías para determinar la retención de humedad y la densidad en el compost. In *Anales Científicos* (Vol. 76, No. 1, pp. 186-192). Universidad Nacional Agraria La Molina.

Tovar, J. A. S. (2017). Mejora de la gestión de purines en granja de porcino y su impacto ambiental (Doctoral dissertation, Universidad Miguel Hernández).

Trujillo, E., Valencia, A., & Cecilia Alegría, M. (2019). Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 489-504.

Wu, L., Ma, L. Q., & Martinez, G. A. (2000). Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost (Vol. 29, No. 2, pp. 424-429). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

APÉNDICE

Tabla 10. Comparación de la calidad del sustrato final (Figura 4 del apéndice) respecto de lo establecido según la NCh2880 y según Abad et al., (1993) y Rodríguez, (2013). Tratamientos: Control (Guano + Paja de maíz); CB1 (Guano + Paja de maíz + 10% Biochar); CB2 (Guano + Paja de maíz + 20% Biochar).

	Tratamientos				
	Control	CB1	CB2	NCh2880	Rodríguez, 2013. Abad et al., 1993.
pH	7,9 a	7,5 b	7,5 b	5,0 – 7,5	5,2 – 6,3
CE (mS/cm)	3,457 a	2,188 b	1,877 b	5	0,75 – 3,5
Dist. de partículas	> 4,75	4,75 - 2	2 – 0,25	-	2,5 – 0,25
DA (kg/m ³)	152,2	139,4	184,9	-	< 400
CRA (%)	363,5 a	418,5 b	479,2 c	-	55 - 70
COT (%)	31,3	28,3	27,5	-	
MO (%)	53,9	48,9	47,4	> 45	> 80
IG (%)	134,5 a	125,2 a	159,5 b	> 90	-
Significancia	***	***	***		

Notas: Valores corresponden a medias. Letras distintas en forma horizontal indican diferencia significativa entre los tratamientos. Nivel de significancia: *** p < 0,05. CE: Conductividad Eléctrica; DA: Densidad Aparente; CRA: Capacidad de Retención de Agua; MO: Materia Orgánica; COT: Carbono Orgánico Total; IG: Índice de Germinación.



Figura 1. Cajas plásticas donde se realizó el co-compostaje



Figura 2. Tratamientos de izquierda a derecha: CB2-Control-CB1.



Figura 3. Presencia de micelio en tratamiento Control en el día 28.



Figura 4. Compost maduro (CB2) al día 94 desde el inicio del ensayo.



Figura 5. Medición de temperatura interna del reactor.



Figura 6. Doble horno pirolizador donde se generó el Biochar utilizado



Figura 7. Interior del horno pirolizador.