

UCH, FC
Q. Ambiental
S 235
c.1

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO DE COMPOSTAJE PARA TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE ORIGEN VEGETAL



Seminario de Título
entregado a la
Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile
en cumplimiento parcial de los requisitos
para optar al Título de



QUÍMICO AMBIENTAL

CLAUDIA CHANTAL SANTIBÁÑEZ VARNERO

Director Seminario de Título: Sra. María Teresa Varnero M.

Comisión de Evaluación de Seminario de Título:

Dra. Margarita Caru M.
Licenciado en Ciencias

Sra. M^a Teresa Varnero M.
Químico Farmacéutico

Sr. Pablo Alvarado V.
Ingeniero Agrónomo

Two handwritten signatures in blue ink, one above the other, corresponding to the names listed in the adjacent text blocks.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera hacer extensivo mi agradecimiento y reconocimiento a las siguientes personas:

A María Teresa Varnero, cuyos comentarios y críticas enriquecieron enormemente mi análisis, por su dedicación y paciencia.

A Fernando Santibáñez por los recursos económicos e intelectuales aportados y por permitir que el proyecto se llevara a cabo en el Centro de Agricultura y Medio Ambiente.

A Germán Saavedra de la I. Municipalidad de La Pintana por su buena disposición para proporcionar materias primas y maquinarias.

A Marta Granget de PROBICAL, quien proporcionó los inoculantes biológicos utilizados en esta investigación.

A Pablo Alvarado por sus sugerencias oportunas y constructivas.

A Fabián por su ayuda, paciencia y cariño.

Quisiera expresar también mi gratitud a todas las personas que me han ayudado, directa o indirectamente, a través de discusiones, consejos y principalmente por la amistad brindada durante el desarrollo de este trabajo.

INDICE DE MATERIAS

	LISTA DE TABLAS.....	vii
	LISTA DE FIGURAS.....	ix
	LISTA DE ABREVIATURAS.....	xi
	GLOSARIO.....	xii
	RESUMEN.....	xvi
	ABSTRACT.....	xvii
I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.1.1	Objetivos Generales.....	3
1.1.2	Objetivos Específicos.....	3
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Definición de compostaje.....	4
2.2	Objetivos, beneficios y limitaciones del compostaje.....	4
2.3	Reacciones bioquímicas.....	6
2.4	Sucesión biológica.....	8
2.5	Requerimientos ambientales.....	9
2.5.1	Balance de nutrientes.....	9
2.5.1.1	Estimación del contenido de carbono.....	10
2.5.1.2	Relación carbono/nitrógeno.....	11
2.5.1.3	El efecto de la lignina sobre la biodegradabilidad.....	12
2.5.2	Tamaño de partícula y soporte estructural de una pila de compost.....	13
2.5.3	Control de la humedad.....	14
2.5.3.1	Cálculo del contenido de humedad.....	15
2.5.4	Requerimientos de aireación.....	16
2.5.5	Temperatura, pH y conductividad eléctrica.....	17
2.6	Control de insectos y emanación de olores.....	18
2.6.1	Control de insectos.....	18

2.6.2	Control de olores.....	19
2.7	Madurez del compost.....	20
2.7.1	Métodos de observación.....	20
2.7.1.1	Olor.....	20
2.7.1.2	Temperatura estable.....	21
2.7.1.3	Color.....	21
2.7.1.4	Peso Específico.....	21
2.7.2	Métodos basados en la evolución de parámetros de biomasa.....	22
2.7.2.1	Respirómetros.....	22
2.7.2.2	Análisis de parámetros bioquímicos de la biomasa de los composts.....	22
2.7.3	Métodos de análisis qcos. para una rápida determinación de madurez....	22
2.7.3.1	Determinación del pH.....	22
2.7.3.2	Relación C/N.....	23
2.7.3.3	Determinación de NH_4^+ y SH_2	23
2.7.3.4	Determinación de la Demanda Química de Oxígeno.....	23
2.8	Aplicaciones y beneficios de la producción de compost.....	23
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1	Ubicación del estudio.....	25
3.2	Metodología.....	25
3.2.1	Materias primas y recursos utilizados.....	25
3.2.2	Diseño de la planta de compostaje.....	28
3.2.3	Diseño del bioensayo de invernadero.....	32
3.2.4	Monitoreo y control del proceso.....	33
3.2.4.1	Propiedades físicas.....	34
3.2.4.1.1	<i>Temperatura.....</i>	34
3.2.4.1.2	<i>Humedad.....</i>	34
3.2.4.1.3	<i>Densidad.....</i>	35
3.2.4.2	Propiedades químicas.....	35
3.2.4.2.1	<i>pH.....</i>	35
3.2.4.2.2	<i>Conductividad eléctrica.....</i>	36
3.2.4.2.3	<i>Capacidad de intercambio catiónico.....</i>	36

3.2.4.3	Contenido en macroelementos y metales pesados.....	36
3.2.4.3.1	<i>Materia orgánica y carbono</i>	36
3.2.4.3.2	<i>Nitrógeno</i>	37
3.2.4.3.3	<i>Potasio</i>	37
3.2.4.3.4	<i>Fósforo</i>	37
3.2.4.3.5	<i>Metales pesados</i>	38
3.2.4.4	Microorganismos patógenos.....	38
3.2.4.5	Ensayo de invernadero.....	38
3.2.5	Análisis estadístico.....	39
2.3.5.1	Análisis de varianza.....	39
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1	Propiedades físicas	40
4.1.1	Temperatura.....	40
4.1.2	Humedad.....	46
4.1.3	Densidad.....	46
4.2	Propiedades químicas	47
4.2.1	pH.....	47
4.2.2	Conductividad eléctrica.....	49
4.2.3	Capacidad de intercambio catiónico.....	49
4.3	Contenido en macroelementos y metales pesados	50
4.3.1	Materia orgánica.....	50
4.3.2	Carbono orgánico total.....	50
4.3.3	Nitrógeno.....	51
4.3.4	Relación carbono/nitrógeno.....	52
4.3.5	Potasio.....	53
4.3.6	Fósforo.....	53
4.3.7	Metales pesados.....	53
4.4	Microorganismos patógenos	54
4.5	Ensayo de invernadero	54
4.6	Análisis de costos	57

4.6.1	Producción con utilización de maquinaria sin incorporación de inóculo.....	57
4.6.2	Producción con utilización de maquinaria con incorporación de inóculo.....	59
4.6.3	Producción vía volteo manual sin incorporación de inóculo.....	60
4.6.4	Producción vía volteo manual con incorporación de inóculo.....	62
4.6.5	Producción con utilización de sistema de aireación forzada.....	63
V	CONCLUSIONES.....	65
VI	BIBLIOGRAFÍA.....	66

ANEXOS

- I. Mediciones de temperatura en las pilas de compost
- II. Análisis fisicoquímicos
- III. Concentración de metales pesados en el compost
- IV. Análisis microbiológicos
- V. Ensayo de invernadero
- VI. Características del suelo utilizado en el ensayo de invernadero

APÉNDICE

Anteproyecto de Norma Chilena de Calidad de Compost

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Temperatura y tiempo de exposición necesario para la destrucción de los parásitos y patógenos más comunes.....	5
Tabla 2	Relaciones carbono/nitrógeno típicas.....	12
Tabla 3	Composición química general de materiales orgánicos.....	17
Tabla 4	Proporción de los residuos orgánicos en compostaje.....	28
Tabla 5	Tratamientos	28
Tabla 6	Temperaturas bajo las cuales se realizó el volteo de las pilas.....	30
Tabla 7	Proporciones de suelo y compost en volumen.....	32
Tabla 8	Temperatura media de las pilas durante el proceso.....	73
Tabla 9	Temperatura atmosférica durante el período de compostaje.....	76
Tabla 10	pH de las pilas durante el proceso.....	77
Tabla 11	Conductividad eléctrica de las pilas durante el proceso.....	78
Tabla 12	Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en aireación forzada.....	79
Tabla 13	Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en testigo.....	79

Tabla 14	Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 3g inoc/m ³	80
Tabla 15	Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 6g inoc/m ³	80
Tabla 16	Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 9g inoc/m ³	81
Tabla 17	Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 12g inoc/m ³	81
Tabla 18	Contenido de N, P y K disponibles, y C.I.C. en el compost final.....	82
Tabla 19	Concentración de metales pesados en el compost.....	83
Tabla 20	Análisis microbiológico del compost.....	85
Tabla 21	Porcentaje de germinación de las semillas de lechuga.....	86
Tabla 22	Expansión del área foliar de la lechuga.....	86
Tabla 23	Características del suelo utilizado en el ensayo de invernadero.....	87
Tabla 24	Concentraciones máximas de metales pesados en compost como contenidos totales.....	89

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Materiales utilizados para la elaboración de las pilas de compost.....	27
Figura 2	Planta piloto de compostaje.....	27
Figura 3	Sistema de aireación forzada.....	31
Figura 4	Pila de residuos con sistema de aireación forzada.....	31
Figura 5	Termómetro digital midiendo la t° alcanzada en una pila de compost....	41
Figura 6	Hongos encontrados en las pilas durante la etapa termofílica.....	41
Figura 7	Evolución de la t° en la pila con aireación forzada y testigo durante el proceso de compostaje.....	44
Figura 8	Evolución de la t° en las pilas con volteo e incorporación de inóculo....	44
Figura 9	T° de la pila con volteo (testigo) a distintas profundidades.....	45
Figura 10	T° de la pila con aireación forzada a distintas profundidades.....	45
Figura 11	Lombrices encontradas en las pilas durante la etapa de enfriamiento.....	46
Figura 12	pH de la pila con aireación forzada durante el proceso.....	48
Figura 13	pH de la pila testigo durante el proceso.....	48

Figura 14	pH de la pila con 3 g inóculo/m ³	48
Figura 15	pH de la pila con 6 g inóculo/m ³	48
Figura 16	pH de la pila con 9 g inóculo/m ³	48
Figura 17	pH de la pila con 12 g inóculo/m ³	48
Figura 18	Relación C/N en los distintos tratamientos.....	52
Figura 19	Lechugas plantadas en sustrato suelo-compost en distintas proporciones.....	56
Figura 20	Expansión del área foliar de las plantas de lechuga.....	56

ABREVIATURAS

AGRIMED:	Centro de Agricultura y Medio Ambiente
C.E:	Conductividad Eléctrica
C.I.C.:	Capacidad de Intercambio Catiónico
CONAMA:	Comisión Nacional del Medio Ambiente
C.O.T.:	Carbono Orgánico Total
D.Q.O.:	Demanda Química de Oxígeno
K disp.:	Potasio Disponible
M.O.:	Materia Orgánica
N disp.:	Nitrógeno Disponible
NMP:	Número Más Probable
N.T.:	Nitrógeno Total
P disp.:	Fósforo Disponible
Relación C/N:	Relación Carbono/Nitrógeno

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acondicionador orgánico de suelos:	Mezcla de origen orgánico cuya función principal es la de mejorar la estructura del suelo. Este producto suele utilizarse una vez que se ha estabilizado biológicamente.
Aeróbico:	Que ocurre en presencia de oxígeno./Anaeróbico: que ocurre en ausencia de oxígeno.
Agente estructurante:	Material, generalmente carbonoso tal como aserrín, chips de madera o ramas trozadas agregadas a un sistema de compostaje para mantener el flujo de aire y prevenir la compactación de los desechos.
Aireación (para compostaje):	Permitir el contacto entre el aire y la materia orgánica sólida compostándose, por medio del volteo o ventilación para permitir el metabolismo aeróbico microbiano (biooxidación).
Biodegradabilidad:	El potencial al cual un componente orgánico puede ser convertido en compuestos simples mediante procesos metabólicos.
Celulosa:	Carbohidrato, componente de la pared celular de las células vegetales.
Componente orgánico:	Sustancias de origen animal o vegetal factibles de ser compostadas.

- Compostaje:** Técnica para el tratamiento de componentes sólidos orgánicos basado en procesos de mineralización y transformación de materia orgánica producida por microorganismos aeróbicos. Como resultado de este proceso se genera mayoritariamente compost, CO₂ y agua. El proceso considera al menos dos etapas; una primera termofílica y una segunda etapa de maduración mesofílica.
- Compost:** Producto inocuo y libre de efectos fitotóxicos que resulta del proceso de compostaje constituido por una materia orgánica estabilizada donde no se reconoce origen, puesto que se habrá degradado generando partículas más finas y oscuras. Su aplicación al suelo, no debe provocar daños a las plantas y podrá ser almacenado sin posteriores tratamientos ni alteraciones siempre y cuando se den las condiciones ambientales adecuadas.
- Compost clase A:** Producto de alta calidad que cumple con las exigencias para compost clase A en todos los parámetros especificados de la normativa nacional. El producto no presenta ninguna restricción de uso y puede ser aplicado a macetas directamente sin mezclarse.
- Compost clase B:** Producto de calidad que cumple con las exigencias para compost clase B en todos los parámetros especificados en la normativa nacional. El producto presenta algunas restricciones de uso. Para ser aplicado a macetas, requiere ser mezclado con otros elementos adecuados.

Compost inmaduro:	Es una materia orgánica que ha pasado por la etapa termofílica del proceso de compostaje donde ha sufrido una descomposición inicial pero no ha alcanzado la etapa mesofílica requerida para obtener un compost maduro. Es un producto que se debe mezclar para ser aplicado y no debe producir hambre de nitrógeno.
Compost maduro:	Sinónimo de compost.
Descomposición:	La degradación de materia orgánica por acción microbiana.
Hemicelulosa:	Carbohidrato de baja solubilidad, comúnmente asociado con la lignina en la pared celular de las células vegetales.
Humus:	Fracción orgánica coloidal del suelo, extremadamente estable frente a cambios en las condiciones ambientales y/o de manejo, formado por ácidos fúlvicos y fulvatos, ácidos húmicos y humatos y por la humina.
Inóculo:	Fuente de microorganismos útiles para iniciar o acelerar el proceso de compostaje.
Lignina:	Compuesto formado por moléculas de polifenoles, constituyente de la pared celular de los vegetales e importante para dar resistencia a la estructura vegetal.
Maduración (o curado):	La última etapa del compostaje que ocurre después de que la mayoría del material ha sido descompuesto. Caracterizada por una estabilización del material, reducción de los patógenos, y permite además la descomposición de celulosa y lignina.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los residuos vegetales de la ciudad constituyen un problema ambiental que implica grandes costos de transporte y disposición. Por otra parte, los nuevos paradigmas de producción limpia y de productos inocuos, están presionando a las empresas por una mayor incorporación de nuevas estrategias para promover la prevención de la contaminación, a través de la integración de elementos de competitividad y de mejoras al medio ambiente. Una manera de contribuir a esto último es incorporar los sustratos orgánicos de origen vegetal en los procesos de producción, ya que estos sustratos constituyen un porcentaje importante del flujo de residuos sólidos urbanos. La recuperación de los residuos orgánicos de origen vegetal mediante su procesamiento en compost es un método de interés creciente en el reciclaje de los residuos sólidos.

Las ventajas que presentan éstos residuos son múltiples, entre ellas, su fácil recolección, bajos costos de procesamiento y obtención de productos para su posterior utilización. Conseguir la confianza de los usuarios del compost elaborado con residuos vegetales no es tan difícil como ganar su confianza para otros tipos de compost.

El compost debe cumplir ciertas condiciones físicas, químicas y biológicas, para lo cual se deben controlar diversos factores para asegurar su calidad.

El producto obtenido es un acondicionador y mejorador de las propiedades físicas del suelo cuando se incorpora a éste, incrementando la capacidad para retener la humedad, retardando la erosión y mejorando la labranza del suelo.

La aplicación de compost a los suelos, hace aumentar la población microbiana existente (responsable de la mineralización de los elementos esenciales para la vida como C, N, P) y por ende la producción de sustancias biológicas activas, útiles para la fertilidad del suelo como vitaminas, hormonas, antibióticos, aminoácidos, entre otros.

La producción de compost se presenta como una opción a la quema de residuos y por consiguiente a la emisión de contaminantes atmosféricos y a la pérdida de materia orgánica en los suelos por calcinación. A su vez, implica una disminución drástica de la cantidad de materia orgánica en los rellenos sanitarios, fuente de generación de olores y atracción de vectores, tales como ratones, moscas y microorganismos patógenos. Como consecuencia, con ello se aumentará significativamente la vida útil de los rellenos sanitarios.

Finalmente, la producción de compost debe entenderse como una actividad que busca desestimular el uso de tierra de hojas y por ende reducir las negativas consecuencias ambientales que ello implica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos generales

- Diseñar una planta de compostaje que permita reciclar residuos orgánicos de origen vegetal con el fin de obtener un producto ambientalmente inocuo que pueda ser posteriormente utilizado como mejorador de las propiedades físicas y químicas de los suelos.
- Utilizar distintos sistemas de compostaje para identificar aquellos que presenten la mayor eficiencia en términos de proceso versus costos operacionales.

1.1.2 Objetivos específicos

- Transformar materiales orgánicos biodegradables de origen vegetal en un material biológicamente estable, reduciendo el volumen original de los residuos.
- Destruir patógenos, huevos de insectos, semillas de malezas y otros organismos indeseables que puedan estar presentes en los residuos vegetales, previniendo la contaminación biológica del ambiente.
- Generar un acondicionador de suelos del mayor valor nutricional posible.
- Determinar el efecto del compost sobre el crecimiento inicial de una especie cultivada.

CAPÍTULO II
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definición de compostaje

Haug (1980) define el compostaje como la descomposición biológica y estabilización de sustratos orgánicos bajo condiciones aeróbicas, que permiten el desarrollo de temperaturas en el rango termofílico como resultado del calor producido biológicamente, obteniéndose un producto final suficientemente estable para el almacenamiento y aplicación al suelo sin efectos ambientales adversos. Otra definición se refiere el compostaje como un proceso aeróbico controlado llevado a cabo por sucesivas poblaciones microbianas combinando actividades mesofílicas y termofílicas, conduciendo a la producción de dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica estabilizada (Pereira-Neta, 1987).

2.2 Objetivos, beneficios y limitaciones del compostaje.

Entre los principales propósitos y ventajas del compostaje se pueden citar:

- *Estabilización de los desechos.* Las reacciones biológicas que ocurren durante el compostaje convertirán las formas putrefactibles de los desechos orgánicos en formas estables, principalmente formas inorgánicas las cuales podrían provocar pequeños efectos de contaminación si se descargan sobre el suelo o en cursos de agua.
- *Inactivación de patógenos.* El calor biológicamente producido en los desechos durante el compostaje puede alcanzar temperaturas sobre 60 °C, la cual es suficiente para inactivar la mayoría de las bacterias patógenas y virus, siempre que esta temperatura se mantenga por al menos un día (Tabla 1). Por lo tanto, los productos compostados pueden ser dispuestos en forma segura sobre el suelo o usados como acondicionadores de éste.

Tabla 1. Temperatura y tiempo de exposición necesario para la destrucción de los parásitos y patógenos más comunes.

ORGANISMO	TEMPERATURA Y TIEMPO DE EXPOSICIÓN
<i>Salmonella typhosa</i>	Son suficientes 30 min. a 55-60 °C para su eliminación. No se desarrolla a temperaturas superiores a 46 °C
<i>Salmonella sp.</i>	Se destruye al exponerse 1 hora a 55 °C o 15-20 minutos a 60 °C
<i>Shigella sp.</i>	Se destruye al exponerse 1 hora a 55 °C
<i>Escheirchia coli</i>	La mayoría mueren con una exposición de 1 hora a 55 °C o 15-20 min. a 60 °C
<i>Taennia saginata</i>	Se elimina en unos pocos minutos a 55°C
Larvas de <i>Trichinella spiralis</i>	Mueren rápidamente a 55°C e instantáneamente a 60 °C
<i>Brucella abortus</i>	Se elimina con exposiciones a 62-63 °C durante 3 min. o a 55°C durante una hora
<i>Micrococcus pyogenes</i> var. aureus	Muere después de 10 minutos de exposición a 50 °C
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Muere después de 10 minutos a 54 °C
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> var. hominis	Muere después de 15-20 a 66 °C o instantáneamente a 67 °C
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Se elimina por exposición durante 45 min. a 55°C
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	Mueren en menos de 1 hora a temperaturas superiores a 55°C

Fuente: *Composting: A Study of the process and its Principles*, 1972

- *Nutrientes y mejoramiento del suelo.* Los nutrientes (N, P, K) presentes en los desechos usualmente se encuentran en formas orgánicas complejas, dificultando la absorción de estos por los cultivos. Después del compostaje, estos elementos se encontrarán en formas inorgánicas tales como nitratos y fosfatos disponibles para la absorción de las plantas (Golueke, 1982).

Se ha estimado que la materia orgánica contiene mas del 75 por ciento del fósforo disponible en el suelo y 50 por ciento del carbono que sirve como fuente de energía para la población microbiana encargada de descomponer los residuos (Darst y Murphy, 1990).

La aplicación de productos compostados a los suelos reduce la pérdida de nutrientes por lixiviación, debido a que los nutrientes inorgánicos se encuentran principalmente en las

formas insolubles, las cuales tienen menos probabilidades de lixiviar que las formas solubles de los desechos no compostados. Además, la labranza del suelo es mejorada, permitiendo así un mejor crecimiento de las raíces y consecuentemente mayor accesibilidad a los nutrientes (Golueke, 1982).

2.3 Reacciones bioquímicas

Las vías de degradación bioquímica de los desechos son muy complejas, encontrándose diversos productos intermediarios y subproductos. Por ejemplo, la degradación de las proteínas y carbohidratos incluyen los siguientes pasos:

Proteínas → peptidos → aminoácidos → compuestos de amonio → biomasa bacteriana y nitrógeno atmosférico o amoniaco.

Carbohidratos → azúcares simples → ácidos orgánicos → CO₂, H₂O y biomasa bacteriana.

Las fases que pueden distinguirse en el proceso de compostaje según la temperatura son:

- Fase latente, la cual corresponde al tiempo necesario para que los microorganismos se adapten a las nuevas condiciones y colonicen en el nuevo ambiente en la pila de compost.
- Fase de crecimiento, la cual se caracteriza por el aumento de la temperatura producida biológicamente a nivel mesofílico.
- Fase termofílica, en la cual la temperatura se eleva hasta el mayor nivel. Esta es la fase donde la degradación y estabilización de los desechos y la destrucción de los patógenos es más efectiva.
- Fase de maduración, donde la temperatura disminuye a nivel mesofílico y, subsecuentemente a temperatura ambiente. Una fermentación secundaria toma lugar la cual es lenta y favorece la humificación; que es, la transformación de algunos complejos orgánicos en coloides húmicos estrechamente asociados con minerales (hierro, calcio, nitrógeno, etc.) y finalmente en humus. Las reacciones de nitrificación

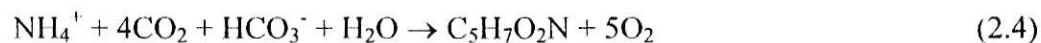
también toman lugar, en las cuales el amoníaco (un subproducto de la estabilización de los desechos) es oxidado biológicamente para transformarse en nitrito (NO_2^-) y finalmente en nitrato (NO_3^-) (Metcalf y Eddy, 1991).



Combinando las ecuaciones (2.1) y (2.2), la reacción de oxidación total para la nitrificación es:



Debido a que el amonio también es sintetizado en el tejido de las células, una reacción representativa para la síntesis a nivel celular es:



La reacción de nitrificación total, combinando las ecuaciones (2.3) y (2.4) es:



Las bacterias nitrificantes responsables de la nitrificación, la conforman de dos grupos principales, las *Nitrosomonas*, las cuales convierten el amonio (NH_4^+) en nitrito (NO_2^-), y las *Nitrobacter*, las cuales convierten el nitrito en nitrato (NO_3^-). Las bacterias nitrificantes tienen una tasa de crecimiento relativamente baja y se inactivan a temperaturas mayores de 40°C (Alexander, 1961), entonces ellas se volverán activas normalmente después de que las reacciones de descomposición de los desechos orgánicos (fase de crecimiento y fase termofílica) hallan finalizado. Debido a que el NO_3^- es la forma de nitrógeno fácilmente disponible para la absorción de los cultivos, la fase de maduración constituye un paso esencial en el compostaje para producir un compost de buena calidad para su uso como acondicionador orgánico del suelo.

En el compostaje aeróbico la degradación de la materia orgánica depende de la presencia de oxígeno. Este tiene dos funciones en las reacciones metabólicas: como aceptor

final de electrones en la respiración aeróbica, y como un sustrato requerido para la operación de un tipo de enzimas denominadas oxigenasas (Finstein y col, 1980).

En el proceso anaeróbico la energía libre (calor) producida es mucho menor que en el compostaje aeróbico, y por ende se requiere un mayor tiempo para la descomposición orgánica y la inactivación de patógenos (Haug, 1980a).

2.4 Sucesión biológica

El compostaje es un proceso biológico en el cual los desechos orgánicos son convertidos en humus estabilizado por la actividad de complejos microorganismos que se encuentran presentes en forma natural en los desechos. Este incluye microorganismos tales como bacterias, hongos y protozoos, y puede incluir también invertebrados menores tales como nematodos, lombrices y otros organismos.

Los desechos orgánicos son inicialmente descompuestos por el primer nivel de consumidores tales como hongos, bacterias y dentro de éstas destacan los actinomicetes. La estabilización de los desechos es realizada principalmente a través de reacciones bacterianas. Las bacterias mesofílicas son las primeras en aparecer. A medida que la temperatura aumenta se desarrollan las bacterias termofílicas, las cuales habitan en todas las partes del compost. Los hongos termofílicos generalmente crecen después de 5-10 días de compostaje. Si la temperatura se vuelve muy alta, por ejemplo, mayor de 65-70 °C, los hongos, actinomicetes, y la mayoría de las bacterias se vuelven inactivas y sólo pueden desarrollarse bacterias que forman esporas. En las etapas finales, como la temperatura desciende, los actinomicetes vuelven a ser el grupo dominante (Strom, 1985).

Las bacterias termofílicas, principalmente del tipo *Bacillus* (Strom, 1985), juegan un rol importante en la descomposición de proteínas y carbohidratos. A pesar de estar confinados principalmente a las capas exteriores de las pilas de compost y de volverse activos sólo durante etapas posteriores del período de compostaje, los hongos y actinomicetes juegan un

importante rol en la descomposición de celulosa, lignina y otros materiales resistentes, los cuales son atacados una vez que los materiales de fácil descomposición han sido degradados. Las especies comunes de actinomicetes son *Streptomyces* y *Thermoactinomyces*, mientras que el *Aspergillus* es la especie de hongo común (Strom, 1985).

Después de estas etapas, los consumidores del primer nivel se transforman en el alimento del segundo nivel de consumidores, tales como escarabajos, nemátodos, protozoos y rotíferos. El tercer nivel de consumidores, tales como centípedos, escarabajos y hormigas, se alimentan de los consumidores del segundo nivel.

Para que el proceso de compostaje funcione eficientemente debe estar presente una cierta cantidad de organismos, los cuales sean capaces de atacar los distintos tipos de residuos y estabilizarlos.

2.5 Requerimientos ambientales

La efectividad de un proceso de compostaje depende de los grupos de organismos que habitan y estabilizan los desechos orgánicos. Cualquier falla en el proceso se puede deber a alguna condición química o física desbalanceada en la pila de compost, lo cual puede ser desfavorable para el crecimiento microbiano. Los parámetros ambientales que requieren ser controlados durante el proceso de compostaje son:

2.5.1 Balance de nutrientes

La composición del compost es bastante variada debido a su origen. Formando compuestos se encuentran principalmente elementos tales como: carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, sodio y calcio; y en estado metálico están presentes fundamentalmente hierro y aluminio, y posiblemente magnesio y cobre. Aún cuando elementos tales como hierro y

aluminio están presentes en cantidades relativamente grandes, se encuentran principalmente como óxidos metálicos, que no constituyen un problema para las plantas. El aluminio es un constituyente frecuente de los suelos, y provoca problemas de toxicidad en suelos con un pH inferior a 5,0. (Satriana, 1974).

El parámetro nutricional más importante es la relación carbono/nitrógeno. El fósforo es el que sigue en importancia, y el azufre, calcio, y cantidades traza de otros diversos elementos juegan un rol importante en el metabolismo celular.

Alexander (1961) reportó que entre 20 y 40 por ciento del carbono de los desechos orgánicos es asimilado en nuevas células microbianas durante el compostaje. El resto es convertido en CO₂ en los procesos de producción de energía. Sin embargo, estas células contienen aproximadamente 50 por ciento de carbono y 5 por ciento de nitrógeno en base seca. Consecuentemente, el requerimiento de nitrógeno en el sustrato para producir compost es 2 a 4 por ciento de carbono inicial, obteniéndose una relación C/N de 30:1 aproximadamente.

2.5.1.1 Estimación del contenido de carbono: El porcentaje de carbono se puede estimar basándose en el contenido de sólidos volátiles. Los sólidos volátiles (SV) son los componentes (principalmente carbono, oxígeno, y nitrógeno) que se calcinan a partir de una muestra seca en un horno a 500-600 °C, quedando sólo la ceniza (principalmente calcio, magnesio, fósforo, potasio, y otros elementos minerales que no se oxidan). Para la mayoría de los materiales biológicos el contenido de carbono se encuentra entre 40 a 60 % de la fracción de sólidos volátiles. Suponiendo un 55 % la formula es: (Adams et al., 1951)

$$\text{Carbono orgánico (\%)} = (\% \text{ SV}) / 1.8 \quad (2.6)$$

$$\text{donde \% SV} = 100 - \% \text{ de cenizas} \quad (2.7)$$

2.5.1.2 Relación carbono/nitrógeno: De todos los elementos requeridos para la descomposición microbiana, el carbono y el nitrógeno son los más importantes. El carbono proporciona una fuente de energía y constituye un 50 % de la masa de las células microbianas. El nitrógeno es el componente principal de las proteínas, ácidos nucleicos y aminoácidos necesarios para el crecimiento y funcionamiento celular (Richard, 1992).

Para proporcionar cantidades óptimas de estos dos elementos cruciales, se puede utilizar la relación carbono nitrógeno (C/N) para cada uno de los componentes del compost. La relación C/N inicial ideal para compostar generalmente es 30:1, o 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno en peso. Si la relación es menor, habrá nitrógeno en exceso y se perderá como gas amoníaco, produciendo olores desagradables. Una relación mayor implica que no hay suficiente nitrógeno para el crecimiento óptimo de las poblaciones de microorganismos, por lo tanto el compost permanecerá relativamente frío y la degradación ocurrirá a una velocidad lenta.

En general, los materiales que son verdes y húmedos tienden tener relaciones C/N más bajas, y aquellos que son café y secos más elevada. Materiales altos en nitrógeno incluyen recortes de césped, recortes de plantas y restos de frutas y verduras. Materiales leñosos, tales como hojas otoñales, chips de madera, aserrín, y papel, son altos en carbono. Se puede calcular la relación carbono/nitrógeno de la mezcla de compost, o se puede estimar las condiciones óptimas simplemente, usando una combinación de materiales que son altos en carbono y otros que son altos en nitrógeno (Richard, 1992).

Una vez que el compostaje comienza, la relación carbono/nitrógeno disminuye gradualmente desde valores superiores a 30:1 hasta alcanzar 10-15:1 para el producto final. Esto ocurre debido a que cuando los compuestos orgánicos son consumidos por los microorganismos, dos tercios del carbono es liberado como dióxido de carbono. El tercio restante es incorporado, junto con parte del nitrógeno, en las células microbianas.

Tabla 2. Relaciones carbono/nitrógeno típicas

Materiales altos en carbono	C/N*
Hojas secas	30-80:1
Paja	40-100:1
Chips de madera o aserrín	100-500:1
Corteza	100-130:1
Mezclas de papel	150-200:1
Diario o trozos de cartón	560:1
Materiales altos en nitrógeno	C/N*
Restos de verduras	15-20:1
Recortes de césped	15-25:1
Abono	5-25:1

Fuente: Dickson, N., T. Richard, y R. Kozlowski. 1991.

Una vez que se conocen las relaciones C/N de los materiales que se van a compostar, se puede utilizar la siguiente fórmula para obtener la relación C/N de la mezcla como un total (Richard, 1992 y Trautmann, 1998):

$$R = \frac{Q_1(C_1 \times (100 - M_1)) + Q_2(C_2 \times (100 - M_2)) + Q_3(C_3 \times (100 - M_3)) + \dots}{Q_1(N_1 \times (100 - M_1)) + Q_2(N_2 \times (100 - M_2)) + Q_3(N_3 \times (100 - M_3)) + \dots} \quad (2.8)$$

donde:

R = relación C/N de la mezcla de compost

Q_n = masa del material n (peso húmedo)

C_n = % carbono del material n

N_n = % nitrógeno del material n

M_n = contenido de humedad (%) del material n

2.5.1.3 El efecto de la lignina sobre la biodegradabilidad: El material de la pared celular de la planta está compuesto de tres constituyentes importantes: celulosa, lignina y hemicelulosa. La lignina es particularmente difícil de degradar, y reduce la biodisponibilidad de los otros constituyentes de la pared celular (Richard, 1992).

La celulosa es una cadena larga de moléculas de glucosa, ligadas unas a otras principalmente con enlaces glucosídicos. La simplicidad de la estructura de la celulosa, con enlaces idénticos que se repiten, implica que sólo se requiere un pequeño número de enzimas para degradar éste material (Ladisich y col, 1983).

La hemicelulosa es un polímero de xilosa, arabinosa, galactosa, manosa y glucosa. Esta molécula le da estabilidad a la pared celular (Lynch, 1992).

La lignina es un polímero complejo de unidades de fenilpropano, las cuales están unidas unas a otras por diferentes enlaces químicos. Esta complejidad la hace resistente a la degradación microbiana. Sin embargo, algunos microorganismos, principalmente hongos, han desarrollado las enzimas necesarias para romper los enlaces de la lignina. (Kirk y Farrell, 1987). Los actinomicetes también pueden descomponer la lignina, pero típicamente degradan menos del 20 por ciento de la lignina total presente. (Crawford, 1986; Basaglia et al., 1992). La degradación de la lignina es un proceso principalmente aeróbico, y en un ambiente anaeróbico la lignina puede persistir por períodos muy extensos. (Van Soest, 1994).

Debido a que la lignina es el componente más recalcitrante de la pared celular de las plantas, mientras mayor sea la proporción de lignina habrá menor biodisponibilidad del sustrato. (Haug, 1993).

2.5.2 Tamaño de partícula y soporte estructural de una pila de compost

La descomposición ocurre principalmente cerca de la superficie de las partículas, donde la difusión del oxígeno dentro de los films acuosos que cubren las partículas es el adecuado para el metabolismo aeróbico, y el sustrato es fácilmente accesible para los microorganismos y sus enzimas extracelulares. Las partículas pequeñas tienen mayor área superficial por unidad de masa o de volumen que las partículas grandes, por lo tanto, si la aireación es adecuada las partículas más pequeñas se degradarán más rápidamente. Los

experimentos han demostrado que el proceso de chipeado de las materias primas del compost puede incrementar la velocidad de descomposición en un factor de dos (Gray y Sherman, 1970).

Un cálculo teórico de Haug (1993) sugiere que en las partículas que tienen un espesor mayor de 1 mm, el oxígeno no difunde completamente hasta el centro de éstas. Por lo tanto, las regiones interiores de las partículas grandes probablemente son anaeróbicas, y consecuentemente, la velocidad de descomposición en estas regiones es más lenta. Sin embargo, las condiciones anaeróbicas son un problema mayor cuando las partículas son extremadamente pequeñas debido a los poros estrechos resultantes, los cuales se llenan de agua fácilmente debido a la acción capilar. Por lo tanto, es necesario agregar un material estructurante, orgánico o inorgánico, el cual tenga un tamaño suficiente como para mantener aire en los espacios de la mezcla de compost y además para darle soporte estructural a la pila de compost. (Polprasert y col., 1980).

2.5.3 Control de la humedad

Un contenido de humedad óptimo en la mezcla de compost es importante para la descomposición microbiana de los desechos orgánicos. El agua es esencial para la solubilización de nutrientes y el protoplasma celular.

Un contenido de humedad bajo el 20% puede inhibir drásticamente la actividad biológica, reduciendo la velocidad de estabilización y retardando el proceso de descomposición por inhibición de la actividad biológica. Como consecuencia de lo anterior, la temperatura de la pila de compost podría descender bruscamente, lo que podría conducir a interpretarse erróneamente como el fin del proceso. Con ello, se obtendría compuestos físicamente estabilizados pero biológicamente inestables (Satriana, 1974).

Un contenido muy alto de humedad puede producir el lixiviado de nutrientes y patógenos desde la pila de compost. En el compostaje aeróbico, el exceso de agua puede bloquear el paso de aire, provocando que la pila de compost se vuelva anaeróbica. Un contenido de humedad entre 50 y 70 por ciento es el más adecuado y debe mantenerse durante el proceso. (Haug, 1979)

2.5.3.1 Cálculo del contenido de humedad: Una vez que se establece que proporciones de los distintos materiales se van a mezclar para hacer el compost, la humedad de la mezcla resultante es uno de los factores críticos a considerar. Para obtener un nivel de humedad adecuado en la mezcla de compost se debe calcular el porcentaje de humedad de cada uno de los materiales que se van a compostar. Para esto, se pesa una cantidad conocida de material y se seca la muestra en un horno a 105°C por 24 horas. Luego se vuelve a pesar la muestra y se determina el contenido de humedad usando la siguiente ecuación:

$$Mn = ((Ww - Wd)/Ww) \times 100 \quad (2.9)$$

donde:

Mn = contenido de humedad (%) del material n

Ww = peso húmedo de la muestra

Wd = peso de la muestra después de secar

Luego se debe escoger un contenido de humedad para la mezcla total. La mayoría de la literatura recomienda un contenido de humedad de 50–60 % en peso para obtener óptimas condiciones de compostaje. Finalmente, se debe calcular las cantidades relativas de materiales que se deben combinar para obtener la humedad deseada. La fórmula general para el porcentaje de humedad es:

$$G = \frac{(Q1 \times M1) + (Q2 \times M2) + (Q3 \times M3) + \dots}{Q1 + Q2 + Q3 + \dots} \quad (2.10)$$

donde:

Qn = masa del material n (peso húmedo)

G = humedad descada (%)

Mn = contenido de humedad (%) del material n

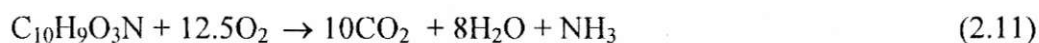
Esta formula se puede utilizar directamente para calcular el contenido de humedad de la mezcla de materiales, y probar diferentes combinaciones hasta que se obtengan resultados dentro de un rango razonable. (Trautmann, 1998).

2.5.4 Requerimientos de aireación

El compostaje aeróbico requiere aireación adecuada para proporcionar oxígeno suficiente para que los microorganismos aeróbicos estabilicen los desechos orgánicos. Esto se puede lograr mediante distintos métodos tales como el volteo periódico de las pilas de compost o inserción de tubos perforados en las pilas. Una manera más eficiente de airear una pila es a través de la aireación forzada, en la cual el aire es bombeado a través de tubos perforados. Cuando se utiliza éste tipo de aireación, el flujo de aire debe estar debidamente controlado. Un exceso de aireación provoca un gasto innecesario de energía y puede generar la pérdida de calor en la pila. Por otra parte, una aireación deficiente puede conducir a condiciones anaeróbicas dentro de la pila de compost.

Un método simple para determinar los requerimientos de aireación se basa en la reacción estequiométrica de la oxidación de los desechos. El conocimiento de la composición química de los desechos que van a ser compostados (Tabla 3) es útil para hacer los cálculos. Como el compost es una combinación de varios compuestos orgánicos, para efectos prácticos, las formulas $C_{10}H_9O_3N$ y $C_5H_7O_2N$ se utilizan para representar su composición química.

Las ecuaciones estequiométricas para la oxidación completa de estos compuestos son:



Parte del NH_3 generado en las reacciones anteriores se pierde por volatilización si el pH de las pilas de compost es superior a 7. El resto del amoníaco será nitrificado para convertirse en NO_3^- durante la maduración o curado de los productos compostados (Haug, 1980).

Tabla 3. Composición química general de materiales orgánicos

COMPONENTE	COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA
Carbohidrato	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_x$
Proteína	$\text{C}_{16}\text{H}_{24}\text{O}_5\text{N}_4$
Grasa y aceite	$\text{C}_{50}\text{H}_{90}\text{O}_6$
Madera	$\text{C}_{295}\text{H}_{420}\text{O}_{186}\text{N}$
Pasto	$\text{C}_{23}\text{H}_{38}\text{O}_{17}\text{N}$
Basura	$\text{C}_{16}\text{H}_{27}\text{O}_8\text{N}$
Bacteria	$\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$
Hongos	$\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{O}_6\text{N}$

Fuente: Haug, 1980. *Organic Waste Recycling*.

2.5.5 Temperatura, pH y conductividad eléctrica

El calor producido biológicamente en una pila de compost es importante por dos razones principales:

1. para maximizar la velocidad de descomposición.
2. para producir un material que sea microbiológicamente inocuo para su uso.

Las temperaturas en el compost que superan los 60-65 °C, sobre el rango termofílico, reducen significativamente la tasa de descomposición en las pilas de compost. Por otra parte, la mayoría de los microorganismos patógenos son efectivamente inactivados a temperaturas por sobre los 50 °C. Por lo tanto, el factor clave es controlar la temperatura en las pilas de compost de manera de optimizar la degradación del material orgánico y la inactivación de

patógenos (aproximadamente 55°C). La temperatura puede ser controlada mediante el ajuste de la aireación y el contenido de humedad (McKinley y col., 1985).

El compostaje aeróbico normalmente procede a un pH cercano al neutro, y escasamente se encuentran bajas o altas extremas de pH. Una pequeña disminución del pH puede ocurrir durante los primeros días de compostaje debido a la producción de ácidos grasos volátiles. Después de este período, el pH nuevamente adquiere un valor cercano a la neutralidad, una vez que estos ácidos se han convertido en metano y dióxido de carbono (McKinley y col., 1985). Si se presentan condiciones anaeróbicas durante el proceso de compostaje, tal como ocurre en pilas demasiado grandes, el pH puede descender hasta 4,5.

La conductividad eléctrica es una medida de la concentración de sales solubles en la fase líquida del compost. Ésta ha sido utilizada ampliamente como criterio de calidad de estos abonos orgánicos (Vogtmann y col, 1993).

2.6 Control de insectos y emanación de olores

2.6.1 Control de insectos

Uno de los problemas más importantes en el proceso de compostaje es el control de los insectos. La basura, el estiércol, los restos de comida, etc., son un medio óptimo para el desarrollo y la propagación de una gran población de insectos, especialmente moscas. (Cantanhede y col, 1993)

La larva de la mosca en el material para el compostaje puede tener su origen en los huevos puestos en el lugar de recolección o en la planta de compostaje. Si la principal fuente estuviera en la segunda opción, el control de las moscas no representaría un problema. Es obvio, por lo tanto, que el material debe ser preparado inmediatamente para el compostaje de modo que la alta temperatura y las condiciones del ambiente impidan el crecimiento de las moscas (Cantanhede y col, 1993).

El ciclo de vida de la mosca doméstica es, usualmente de 7 a 14 días cuando las condiciones son favorables. El tiempo para los diferentes estados varía con la temperatura y otras condiciones, pero en promedio se puede considerar como sigue: huevo, 1-2 días; larva, 3-5 días; crisálida, 3-5 días; surgimiento de la mosca joven, 7-11 días; y puesta de huevos para nuevas moscas, 10-14 días. Las medidas para el control de las moscas deben interrumpir este ciclo y prevenir el surgimiento de moscas adultas (Gotaas, 1956).

Los procedimientos como la molienda, el volteo y la limpieza sistemática, son útiles para proporcionar un compost de buena calidad y para destruir parásitos y microorganismos patógenos, son también efectivos para controlar la proliferación de las moscas (Gotaas, 1956).

2.6.2 Control de olores

El control de la emanación de olores es uno de los problemas más difíciles. Las fuentes de olor en los residuos orgánicos generalmente provienen de compuestos de bajo peso molecular y volátiles, tales como los metil mercaptanos, metil sulfuros y aminas. Para regular y controlar los olores es necesario cuantificarlos y medirlos, usando técnicas químicas/instrumentales (Haug, 1980b).

La emanación de olores es mucho más intensa si el proceso de fermentación se da en forma anaerobia, es decir, en ausencia de oxígeno. El proceso anaerobio, además de producir mal olor, exhala gases peligrosos y no siempre se alcanza un punto correctamente estabilizado. Por lo tanto, es necesario asegurar la circulación de aire y la humedad conveniente para garantizar que el proceso permanezca aerobio, reduciendo así la emanación de olores desagradables.

2.7 Madurez del compost

Existen muchos criterios para establecer la madurez en un proceso de compostaje. En general, un producto compostado debe contener un bajo contenido orgánico que no sufra de posteriores fermentaciones cuando es descargado en el suelo, y los patógenos deben ser inactivados. Algunos de los criterios para medir el grado de estabilización del compost son (Haug, 1980b):

- a) declinación de la temperatura
- b) disminución del contenido orgánico del compost medido por el contenido de sólidos volátiles, demanda química de oxígeno, porcentaje de carbono o contenido de cenizas y la relación carbono/nitrógeno.
- c) presencia de constituyentes particulares tal como nitratos, y ausencia de otros tal como amoníaco.
- d) ausencia de insectos o desarrollo de larvas en el producto final.
- e) ausencia de olores desagradables.
- f) presencia de un color blanco o gris debido al crecimiento de actinomicetes.

Un adecuado proceso de compostaje y posterior maduración de los residuos orgánicos, garantiza que la utilización de éste producto final en la agricultura no provoque efectos perjudiciales para el suelo o para las plantas (Polo y col, 1991).

2.7.1 Métodos de observación

2.7.1.1 Olor: Los materiales orgánicos frescos tienen inicialmente un olor característico, debido posiblemente a la fase de descomposición de ácidos orgánicos: ácido acético, propiónico, burtico, etc.; los olores pueden aparecer en el centro de la pila de compostaje bajo condiciones de anaerobiosis, con la consiguiente producción de ácido sulfhídrico, amoníaco y mercaptanos. Los olores anómalos desaparecen con la madurez de los productos.

El olor de un compost maduro es semejante al de un suelo de bosque (similar al de tierra mojada), y está causado fundamentalmente por los actinomicetos. (Polo y col, 1991)

2.7.1.2 Temperatura estable: Durante la fase de compostaje la temperatura aumenta, manteniéndose entre 60 y 70°C durante unos días y disminuye posteriormente hasta temperatura prácticamente ambiental. En este sentido, se puede considerar a un compost como maduro cuando la curva de temperatura se estabiliza igualándose a la del ambiente y no varía prácticamente con el volteo del material. (Polo y col, 1991)

2.7.1.3 Color: Durante la descomposición de los materiales orgánicos frescos, su color y estructura cambian y casi no se parecen a la que tenían en un principio. El compost se oscurece con la madurez, llegando a un color marrón oscuro, o casi negro, debido a la formación de grupos cromóforos, fundamentalmente de compuestos con dobles enlaces conjugados. Aunque las reacciones y mecanismos que originan estos cambios no están aún del todo claros, en ellos podemos incluir reacciones propias del proceso de humificación, tipo amino-carbonilo (reacción de Maillard), sin descartar otras de humificación a menor temperatura. (Polo y col, 1991). Aunque el cambio de color con el compostaje (oscurecimiento) se detecta visualmente, Sugahara y col. (1984) describieron una técnica basada en la utilización de los sistemas colorimétricos estándar CIE, con el objeto de determinar un valor mínimo de Y (grado de luminosidad) de las coordenadas triestimulares que sirviese como índice del grado de luminosidad. Dicho índice, se encuentra estrechamente ligado a la relación C/N y aceptable para ser empleado como índice de madurez. (Smith y Guild, 1931)

2.7.1.4 Peso específico: Se incrementa su valor con el proceso de compostaje; dichos aumentos van desde un 0.2-0.5 hasta un 0.5-0.9 en el caso de que en el compost intervenga el residuo sólido urbano; el crecimiento de este parámetro estará, por tanto, en función de los residuos iniciales que forman el compost. (Polo y col, 1991)

2.7.2 Métodos basados en el estudio de la evolución de parámetros de biomasa

2.7.2.1 Respirómetros: Consiste en calcular el oxígeno absorbido en la respiración o el CO₂ desprendido; este parámetro indicará la mineralización de la materia orgánica y su evolución durante el ensayo. (Benistant, 1978)

2.7.2.2 Análisis de parámetros bioquímicos de la biomasa del compost: La evolución del proceso de compostaje puede seguirse midiendo las variaciones que experimentan ciertos parámetros bioquímicos, como son la concentración de ATP o la actividad de enzimas hidrolíticos. Durante la fase de compostaje, este tipo de parámetros bioquímicos tiende a decrecer. Otros métodos se basan en el estudio de las enzimas testigos de la actividad celular. Se cree que las actividades enzimáticas más elevadas corresponden a los suelos considerados más fértiles (Frankerberger y Dick, 1983). Del mismo modo se ha estudiado la relación entre grado de madurez de un compost y la actividad de las enzimas (Godden, 1986). Otras medidas referentes a la biomasa microbiana se ocupan de la determinación del contenido en fosfolípidos de la membrana celular y de la velocidad de incorporación de acetato marcado con ¹⁴C (McKinley y col, 1984).

2.7.3 Métodos de análisis químicos para una rápida determinación de la madurez

2.7.3.1 Determinación del pH: En términos generales, es un parámetro que desciende ligeramente al principio, para subir posteriormente conforme lo hace la temperatura; después desciende hasta quedar estabilizado en la maduración, en valores que oscilan entre 7 y 8 (Nogales y col, 1982). Si los valores descienden demasiado, será señal de que se ha producido anaerobiosis y de que el material no está maduro. Con respecto al pH, Jann y col (1959) realizaron un ensayo basándose en lo expuesto anteriormente, consistente en incubar el material final en condiciones de anaerobiosis a una temperatura de 55 °C y medir el pH. Si a las 24 horas del comienzo el pH está alcalino, concluyen que dicho producto está maduro.

2.7.3.2 Relación C/N: Juste y Pomel (1977) proponen hacer un seguimiento de éste parámetro a lo largo del proceso de compostaje, para poder trabajar con el cociente entre la relación C/N inicial y final, lo cual puede dar mejor idea sobre la madurez de los materiales. Por lo general, un compost se considera maduro cuando la relación C/N es menor de 20 (Clairon y col, 1982), o lo más cercano a 15 (Juste, 1980); en la práctica este valor puede ser algo superior, ya que si existe bastante carbono en formas resistentes como celulosa y lignina, no pueden ser utilizadas por los microorganismos (Gotaas, 1956).

2.7.3.3 Determinación de NH_4^+ y SH_2 : Si al final del proceso de compostaje se detectasen cantidades apreciables de estos dos productos, sería indicativo de que durante el mismo ha existido un potencial redox inadecuado de los materiales; concretamente, la cantidad de ion amonio del compost que se considera maduro, no debe sobrepasar una concentración de 0,04 % (Spohn, 1978).

2.7.3.4 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO): Lossin (1971) indica que un compost puede considerarse maduro cuando su DQO es inferior a 700 mg/100g, aunque dicho valor se reduce si se deja madurar más tiempo.

2.8 Aplicaciones y beneficios de la producción de compost

La fertilidad del suelo está relacionada de manera importante con la cantidad de materia orgánica que contiene y particularmente con la cantidad de nitrógeno presente. La materia orgánica incluye humus, raíces de plantas, bacterias, hongos, lombrices, insectos, etc. Cuando un suelo virgen es cultivado sin ser fertilizado, su contenido de materia orgánica y rendimiento se reducen con el tiempo. (Satriana, 1974)

Es posible mantener una alta productividad aplicando al terreno fertilizantes, según las dosis y en los períodos que requieren los cultivos. Se obtienen rendimientos altos con el uso combinado de fertilizantes químicos y orgánicos. Sin embargo, pueden obtenerse

rendimientos altos en las cosechas, y de una forma más económica, si se adiciona al suelo solamente un fertilizante químico, pero esto trae como consecuencia un empobrecimiento del suelo de cultivo.

Si el suelo presenta un contenido bajo de materia orgánica, el uso continuo de fertilizantes químicos que no tienen un sustento orgánico puede hacer decrecer el rendimiento de las cosechas en el tiempo (Satriana, 1974). Sin embargo, el rendimiento no es la única consideración a tomar en cuenta para la evaluación de los beneficios del compost. En experimentos realizados en Estados Unidos se pudo constatar un incremento en los niveles de nutrientes en las cosechas. Por ejemplo, las papas cultivadas en suelos con compost presentaron un contenido superior de un 6 % en nitrógeno, fósforo y potasio que aquellas que crecieron en suelos con fertilizantes químicos sin compost. En promedio, se encontró que la avena y la cebada, cultivadas en suelos con compost, presentaron un contenido de nutrientes 4 y 9 % respectivamente, más alto que los mismos cultivos en suelos sin compost (Satriana, 1974).

CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DEL ENSAYO

El estudio del reciclaje de residuos orgánicos de origen vegetal para la elaboración de compost se llevó a cabo en la Planta Piloto de Compostaje del Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, en la comuna de La Pintana, ubicado en la Región Metropolitana a 33° 34' de Latitud Sur y 70° 38' de Longitud Oeste y tuvo una duración aproximada de nueve meses.

3.2 METODOLOGÍA

3.2.1 Materias primas y recursos utilizados

Se llevaron a cabo seis procesos de compostaje con distintos tratamientos, en los cuales se mezcló residuos vegetales provenientes de ferias libres, hojas secas del jardín de la Facultad y ramas chipeadas (Figura 1).

Se ha señalado la conveniencia de compostar residuos orgánicos de diverso origen y características con el fin de aportar a la mezcla un rango amplio de constituyentes, microorganismos y optimizar los parámetros del compostaje. Por esta razón, se agregó a la mezcla una porción de chips de madera y de hojas secas, los cuales son residuos lignocelulósicos de lenta descomposición y elevada relación C/N (>30), además se agregaron restos vegetales frescos, de esta manera se enriqueció la pila con nitrógeno, compuestos orgánicos sencillos de rápida biodegradación y microorganismos, activándose el proceso de descomposición conducente a la disminución progresiva del balance C/N mencionado anteriormente.

El proceso de compostaje se llevó a cabo en un recinto cercado para impedir la entrada de animales o personas ajenas a la instalación en un área de 600 m². (Figura 2)

Las herramientas utilizadas en este trabajo fueron: pala, horqueta, rastrillo, carretilla además de una manguera para el riego de las pilas.

Se contó con el apoyo de un obrero para las labores de construcción del cerco, remoción de materiales inertes, limpieza del área, acondicionamiento del terreno y construcción de las pilas de compost.

Se determinó la densidad de los materiales entrantes mediante un dinamómetro y un recipiente de volumen conocido.

Las densidades determinadas fueron las siguientes:

RESTOS VEGETALES:	0.49 ton/m ³
HOJAS SECAS:	0.31 ton/m ³
CHIPS DE MADERA:	0.44 ton/m ³
MEZCLA:	0.46 ton/m ³

Para optimizar los parámetros de compostaje se elaboró una mezcla (Tabla 4) tal que se obtuviera una relación carbono/nitrógeno y un porcentaje de humedad estimados cercanos a 30 y 50% respectivamente, para lo cual se utilizó las ecuaciones 2.8 y 2.9.



Figura 1. Materiales utilizados para la elaboración de pilas de compost



Figura 2. Planta piloto de compostaje

Tabla 4. Proporción de los residuos orgánicos en compostaje

Ingrediente	% Carbono	% Nitrógeno	Proporción	Relación C/N	% Humedad
Restos vegetales	51,94	2,54	5/10	20,80	78,93
Hojas secas	52,29	0,89	2/10	62,24	34,02
Chip	52,74	0,33	3/10	194,78	9,10
Promedio				31,80	51,59

3.2.2 Diseño de la planta de compostaje

Se llevó a cabo seis tratamientos para elaborar compost mediante el método de pilas de compostaje (Tabla 5). Las materias primas fueron mezcladas de tal manera de homogeneizarlas y luego fueron dispuestas sobre una capa de chips de 10 centímetros de espesor, en contacto directo con el suelo para así propiciar la ventilación y permitir la circulación de aire desde la parte inferior de la pila, hasta que la pila alcanzara una altura aproximada de 1 metro y una base de 1 x 3 metros.

Tabla 5. Tratamientos

PILA	TRATAMIENTO
Testigo	Testigo (sin inóculo), con volteo
T1	Aireación Forzada
T2	Volteo e incorporación de 3 g inóculo/m ³
T3	Volteo e incorporación de 6 g inóculo/m ³
T4	Volteo e incorporación de 9 g inóculo/m ³
T5	Volteo e incorporación de 12 g inóculo/m ³

Para el tratamiento con aireación forzada se diseñó y construyó un sistema que consta de una caja metálica, la cual por un extremo tiene adosado un extractor de aire (capacidad de 1200 m³/hora), el cual funciona en forma intermitente con la ayuda de un timer, y por el otro extremo consta de tres tubos de PVC de 12 cm de diámetro y 4 m de largo cada uno. Estos tubos además, tienen orificios en forma regular cada 20 cm.

Los residuos orgánicos se depositaron sobre los tres tubos de PVC de modo que éstos quedaran en la base de la pila. Este sistema permite una transformación rápida y controlada de los residuos orgánicos de forma que no se requiere el volteo de la pila para propiciar la aireación. (Figuras 3 y 4)

Considerando la falta de experiencias previas en la aplicación de un sistema de aireación forzada, se hicieron pruebas con distintos niveles de aireación hasta encontrar el más conveniente tomando como referencia la temperatura alcanzada por la pila. Finalmente se estableció que el nivel de aireación más adecuado para este caso es de 300 m³ de aire al día, lo cual equivale a 15 minutos por día de funcionamiento del extractor de aire.

Los inóculos utilizados, *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viride* y *Bacdemo* (productos elaborados por PROBICAL), resisten temperaturas hasta 40°C y su temperatura óptima es cercana a los 30 °C. Por este motivo, se incorporaron a las pilas de compost una vez finalizada la fase termofílica, es decir, cuando la temperatura no sobrepasaba los 40 °C. Estos microorganismos actúan a nivel lignocelulósico, acelerando el proceso de descomposición de la materia orgánica y degradando los componentes más resistentes de los residuos vegetales.

Para mantener los niveles de oxigenación en las pilas sin aireación mecánica se procedió a voltear periódicamente la masa en función de la temperatura, con el objeto de introducir el material de la parte externa al interior y compostar así toda la masa por igual, tomando como criterio cuando la temperatura era inferior a la señalada en la tabla 6.

Tabla 6. Temperaturas bajo las cuales se determinó el volteo de las pilas

Nº DE VOLTEO	TEMPERATURA
1	50
2	50
3	45
4	40
5	30
6	20
7	15

Para incorporar el inóculo se procedió de la siguiente manera: se mezcló las cantidades de inóculo fúngico especificadas en la tabla 5, el cual se encontraba en medio sólido, con el Bacdemo (suspensión bacteriana), luego se agregó 500 ml de agua destilada y se aplicó por aspersión en la pila correspondiente de manera que la suspensión se distribuyera en forma homogénea. Para asegurar un buen mezclado se procedió a voltear cada pila.

Las pilas se regaron constantemente tratando de mantener el porcentaje de humedad entre 45-55 % considerado favorable para la actividad microbiana, se cubrieron con malla Rashel para minimizar la pérdida de humedad por evaporación y evitar el contacto con moscas y otros insectos.

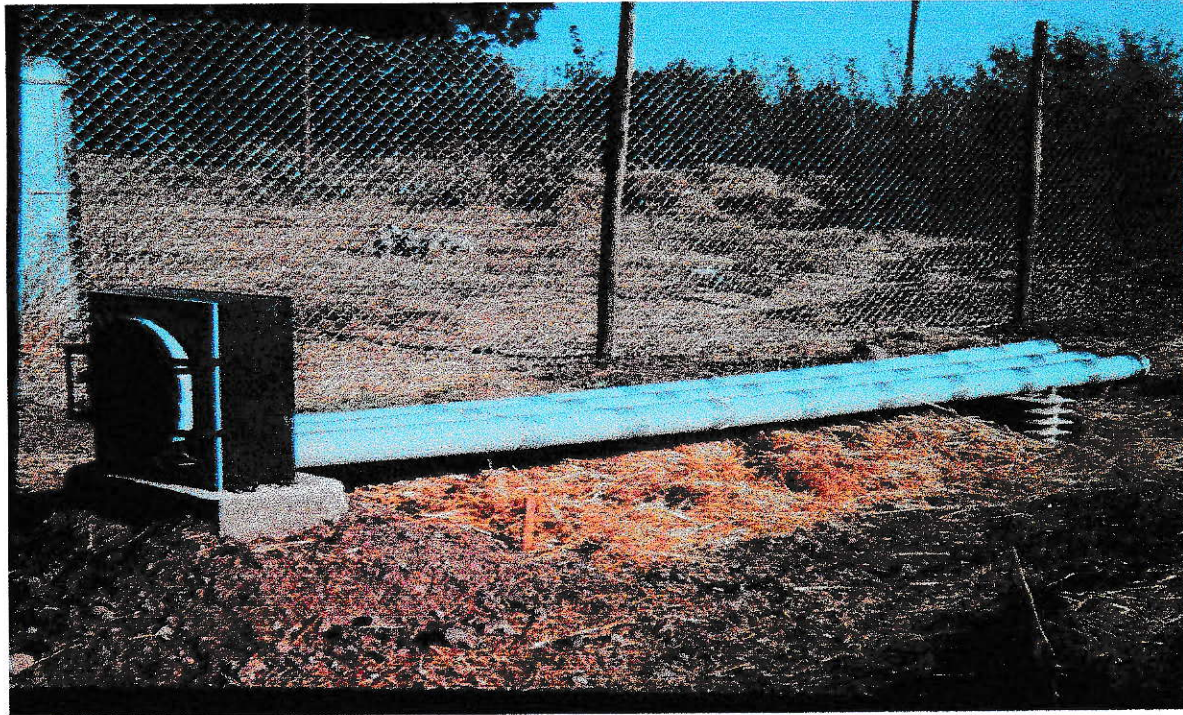


Figura 3 Sistema de aireación forzada



Figura 4 Pila de residuos con sistema de aireación forzada

3.2.3 Diseño del bioensayo de invernadero

El objetivo de este ensayo fue determinar el efecto del compost sobre la germinación y crecimiento de la lechuga. Se escogió la semilla de esta hortaliza debido a su rápido crecimiento, presentando además una cierta resistencia al ataque de hongos, los cuales podrían conducir a conclusiones erróneas en el caso de presentarse.

Este ensayo se llevó a cabo entre los meses de septiembre y noviembre, y se contó con un invernadero con aire acondicionado de la Facultad. Se utilizaron macetas plásticas de 1 litro, compost, suelo de la serie Santiago (Campus Antumapu) y semillas de *Lactuca sativa* L. var. longifolia (lechuga Costina).

Para la preparación de los sustratos se tomó suelo de la capa arable de los primeros 20 cm y compost estabilizado procedente del tratamiento de volteo con aplicación de 6 g de inóculo/m³. Ambos materiales se tamizaron a 6 mm. Los diferentes tratamientos consistieron en distintas proporciones en volumen de suelo y compost (Tabla 7), en cada uno de los cuales se puso 3 semillas por maceta, las cuales se dispusieron a 1 cm de profundidad aproximadamente y una vez que éstas germinaron se ralearon para así dejar una planta por maceta.

Tabla 7 Proporciones de suelo y compost en volumen

TRATAMIENTO (% SUELO/ % COMPOST)	Nº DE REPLICAS (CON 3 SEMILLAS EN CADA UNA)	Nº DE SEMILLAS
100% suelo	12	36
75/25	12	36
50/50	12	36
25/75	12	36
100% compost	12	36

Todas las macetas dispuestas al azar se pusieron en la misma sala del invernadero para minimizar cualquier variación en la temperatura, luminosidad y cualquier otro factor ambiental.

El riego se realizó en forma manual, entregando a cada planta la misma cantidad de agua (150 cc) diariamente.

Para evaluar la expansión del área foliar de las plantas en el tiempo, se procedió a pesar en una balanza analítica un trozo de papel con un área de 100 cm². Esta labor permitió establecer una relación entre el peso y el área del papel. Luego, se procedió a fotocopiar 14 hojas de lechuga de distintos tamaños, las cuales fueron cuidadosamente recortadas. Estas se pesaron y según la relación anterior, se determinó el área foliar de cada una de ellas.

Finalmente, se midió el ancho y largo máximos de las hojas de lechuga y se estableció una nueva relación (largo x ancho vs área foliar), a partir de la cual se pudo obtener la siguiente ecuación lineal:

$$Y = 0,6849X \quad (3.1)$$

donde Y = área foliar

X = ancho máx. x largo máx.

3.2.4 Monitoreo y control del proceso de compostaje

Se tomaron 3 submuestras en distintos puntos de la pila obteniéndose una muestra compuesta de 1 Kg, para así obtener una muestra representativa a partir de la cual se efectuaron los análisis físicoquímicos. La muestra se seco en estufa a 105 °C hasta peso constante. La muestra seca se trituro en un molino de aspas.

3.2.4.1 Propiedades físicas

3.2.4.1.1 Temperatura

La temperatura –parámetro que mide indirectamente el calor liberado por los microorganismos al descomponer la materia orgánica- se midió diariamente introduciendo hasta el centro de la pila de residuos un termómetro digital, -200 a 800°C, siendo cada lectura el promedio de doce mediciones hechas en lugares diferentes de la pila.

Se introdujo el bulbo del termómetro y se esperó un tiempo suficiente para permitir la estabilización de la temperatura en el termómetro y luego se registró el valor leído (Fig. 5).

Además se instaló un logger de 4 canales en las pilas de aireación forzada y testigo (2 canales en cada una), con el fin de llevar un control de la variación de temperatura durante el proceso cada 1 hora a 15 y 50 centímetros de profundidad.

En función de éste parámetro se realizaron los volteos cuando la temperatura empezaba a descender. Esta labor permitió mezclar aquellas capas externas frías, no descompuestas con el núcleo central más biodegradado, reiniciándose así el proceso de conversión microbiológica.

3.2.4.1.2 Humedad

Para conocer el porcentaje de humedad del material:

- Se pesó aproximadamente 20 g de la muestra de compost.
- Se puso la muestra en una cápsula metálica previamente pesada para restar el peso de ésta a la muestra.
- Se llevó la muestra a un horno a 105 °C por 24 horas.
- Se volvió a pesar la muestra una vez seca.

- El porcentaje de humedad se obtiene mediante la ecuación 2.9.

3.2.4.1.3 Densidad

Se determinó la densidad de la mezcla inicial y del producto final utilizándose un recipiente de 25 litros y un dinamómetro, para lo cual se tomó muestras de varios puntos de las pilas.

3.2.4.2 Propiedades químicas

3.2.4.2.1 pH

El pH fue utilizado como un indicador del proceso. Se sabe que, cuando cambia de la condición aerobia a la anaerobia, presenta una caída hasta aproximadamente 4,5. Después de realizar mediciones periódicas del pII durante las dos primeras semanas, éstas se espaciaron a intervalos mayores debido a que las variaciones registradas empezaban a ser insignificantes.

Se usó un pHmetro para medir este parámetro en un extracto de compost, mezclando compost con agua destilada.

El método empleado para este análisis fue el siguiente:

- Se secó por 24 horas en un horno a 105 °C la muestra de compost.
- Se pesó 5 g de la muestra previamente seca a 105 °C y se depositó en un vaso precipitado.
- Se agregó 100 ml de agua destilada a la muestra.
- Se agitó cuidadosamente tratando de obtener una mezcla homogénea y se dejó reposar por 10 minutos.

- Se leyó el pH con un pHmetro calibrado y se registró la medición.

3.2.4.2.2 Conductividad Eléctrica

La facilidad de paso de una corriente eléctrica en el suelo está determinada por la presencia de iones en disolución. La alta concentración de solutos en el suelo (reflejada por este parámetro) disminuye el potencial osmótico del mismo. Esta disminución tiene como efecto la reducción de la disponibilidad del agua para las plantas provocando su marchitamiento, además del efecto directo que pueda provocar el contenido en exceso de algún ion en particular.

Esta propiedad química se determinó en forma periódica con un conductivímetro, utilizándose el mismo extracto acuoso del compost empleado para medir el pH.

3.2.4.2.3 Capacidad de Intercambio Catiónico

En el suelo se mantiene un equilibrio dinámico de iones entre la fase líquida y sólida. Este parámetro mide la cantidad total de iones (expresado en cmoles.kg^{-1}) que es posible intercambiar. Este análisis se realizó por espectrofotometría de absorción atómica. Saturación con acetato de amonio.

3.2.4.2 Contenido en Macroelementos y Metales Pesados

3.2.4.3.1 Materia Orgánica y Carbono

El contenido de cenizas se cuantificó por pérdida de peso, después de calcinación a 600 °C durante 2 horas. El porcentaje de materia orgánica se determinó como la diferencia

entre el 100 % y el porcentaje de cenizas. A partir de esta determinación se puede obtener además el porcentaje de carbono orgánico total aplicando las ecuaciones 2.6 y 2.7. Estos contenidos se controlaron cada dos semanas durante el proceso.

3.2.4.3.2 Nitrógeno

El contenido de nitrógeno total, al igual que el carbono, se evaluó cada dos semanas durante el proceso mediante el método de Lachica et al.(1965)

Al producto final se determinó nitrógeno disponible por el Método Bremner (1965) Extracción con KCl 2 N, destilación microkjeldahl, en el Laboratorio de Suelos de AGROLAB.

3.2.4.3.3 Potasio

Se evaluó el contenido de potasio disponible por el método de espectrofotometría de absorción atómica. Extracción con acetato de amonio a pH 7.0 en el Laboratorio de Suelos de AGROLAB.

3.2.4.3.4 Fósforo

Se midió el contenido de fósforo disponible por el método de Olsen (1965). Extracción con bicarbonato de Sodio en el Laboratorio de Suelos de AGROLAB.

3.2.4.3.5 Metales pesados

Para determinar la concentración de metales pesados en el compost se envió las muestras al Centro de Estudios Para el Desarrollo de la Química (CEPEDEQ) de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile, donde se realizaron los análisis por el método de ICP espectrometría de masas.

3.2.4.4 Microorganismos Patógenos: Los análisis microbiológicos de Coliformes Totales y Fecales y Salmonella se realizaron en el Laboratorio MICAL Ltda. por el método de Número Más Probable (NMP).

3.2.4.5 Ensayo de Invernadero: Se registró el porcentaje de germinación de las semillas de lechuga en los distintos sustratos. Se midió el ancho y largo máximos de todas las hojas de lechuga y se calculó el área de cada hoja según la ecuación 3.1. Luego se sumó las áreas de todas las hojas de la planta y de esta manera se obtuvo el área total. Estas mediciones se realizaron aproximadamente cada 10 días.

3.2.5 Análisis Estadístico

Para realizar el análisis estadístico los valores expresados en porcentaje se transformaron mediante conversión a grados o transformada de BLISS (Scheffler, 1981) utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Grados} = \arcsen \sqrt{P}$$

Donde P representa el valor porcentual o proporción. Si este valor se encuentra como porcentaje debe dividirse por 100. Este procedimiento permite transformar los valores porcentuales discretos en valores continuos para posteriormente realizar el análisis de varianza correspondiente.

3.2.5.1 Análisis de varianza: Los datos finales de contenido de materia orgánica, nitrógeno total, conductividad eléctrica y pH se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA), para determinar si existían diferencias significativas en las características del producto final obtenido por los distintos tratamientos. El porcentaje de confiabilidad correspondió al 95 %.

Finalmente se efectuaron las pruebas de rangos múltiples de DUNCAN para la comparación y jerarquización de medias de los tratamientos, cuando existieron diferencias significativas entre ellos, utilizando un nivel de significancia del 95 % (Walpole y Myers, 1987).

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PROPIEDADES FÍSICAS

4.1.1 Temperatura

En todos los tratamientos la temperatura alcanzó el rango termofílico entre 45 y 65°C cuatro días después de conformadas las pilas, no se observaron temperaturas superiores a 70°C inhibitorias de la actividad microbiana. Los picos máximos de temperatura durante los primeros quince días, corresponden a la intensa actividad degradativa de los microorganismos termofílicos sobre los compuestos fácilmente alterables como azúcares, almidones y grasas.

En todas las pilas se observó la aparición de hongos termofílicos aproximadamente a los 12 días de iniciado el proceso cuando la temperatura se encontraba entre 57-60 °C. Estos hongos predominaban principalmente entre los 10 y 25 cm de profundidad y presentaban un color azul suave. (Figura 6)

Cabe destacar que durante 54 días en la pila con aireación forzada y 43 días en las otras pilas, la temperatura se mantuvo próxima a 45 °C, señalada por Walter y col.(1992) como óptima para el consumo de oxígeno y pérdida de peso de la materia orgánica.

En el material compostado se cumplieron satisfactoriamente las fases termofílica y mesofílica subsiguiente, la cual involucra la degradación de la materia orgánica por parte de abundantes bacterias saprofitas, actinomicetos, hongos y es un aspecto decisivo para la maduración y eliminación de microorganismos patógenos del compost (Poincelott, 1972; De Bertoldi y col. 1983).



Figura 5. Termómetro digital midiendo la temperatura en una pila de compost



Figura 6. Hongos encontrados en las pilas durante la etapa termofílica

La fase termofílica se mantuvo por más tiempo en la pila con aireación forzada, diferencia que se puede atribuir a la mejor oxigenación, ya que el sustrato de compostación utilizado fue el mismo en todos los tratamientos, lo cual mejora la acción de los microorganismos termofílicos, favoreciendo así el mantenimiento de las altas temperaturas en el centro de la pila. Por el contrario, en los otros tratamientos al comenzar a compactarse el material se forman zonas donde se hace más pobre la oxigenación y consecuentemente, la temperatura disminuye rápidamente, haciéndose necesario el volteo para facilitar la aireación.

El riego y el volteo de los materiales a partir de los 60 días no aumentó la temperatura interna de la pila hasta el rango termofílico, manteniéndose próxima a la temperatura ambiental, por lo cual se consideró que el compost había alcanzado la etapa final de estabilización.

En la figura 7 se observa que la pila testigo presenta descensos bruscos de temperatura, los cuales coinciden con el volteo de la pila. Posteriormente al volteo, la temperatura interna de la pila asciende nuevamente y una vez que se alcanza la etapa mesofílica la temperatura no sufre mayores variaciones con los volteos.

En la pila con aireación forzada se observa que el descenso de temperatura es más gradual y las temperaturas promedio de la pila son mucho mayores que en el resto de las pilas durante los primeros 60 días (Tabla 8, Anexo 1).

En la figura 8 se puede constatar que el comportamiento de las pilas con volteo e incorporación de distintas dosis de inóculo es muy similar en cuanto a las variaciones de temperatura, observándose que al igual que en la pila testigo, la temperatura desciende bruscamente con los volteos y posteriormente asciende.

Por otra parte, al observar los resultados de temperatura registrados en el logger (Figuras 9 y 10), se puede constatar que durante toda la etapa termofílica y gran parte de la mesofílica, la temperatura interna de la pila es independiente de la temperatura atmosférica.

Sin embargo, en la etapa de estabilización del material, se puede observar que la temperatura es similar a la del ambiente observándose la tendencia a un descenso de la temperatura en las primeras horas de la mañana (07:00 – 09:00 AM) y un aumento de ésta en horas de la tarde (15:00-17:00 PM).

La temperatura interna de las pilas presentó una variación considerable según la profundidad, observándose que a los 50 cm la temperatura era aproximadamente 10 °C más alta que a los 15 cm de profundidad. Esta tendencia se observa durante los primeros 60 días y luego la temperatura en los distintos niveles de profundidad comienza a igualarse paulatinamente (Figuras 9 y 10).

La fase de enfriamiento involucra temperaturas entre 45°C y 20 °C, en esta etapa apareció una gran cantidad lombrices (*Eisenia foetida*) en todas las pilas (Figura 11). Finalmente, la fase de madurez (con temperaturas menores a 20 °C), fue muy similar en todos los procesos. Se considera que en esta etapa la actividad microbial se reduce, produciéndose un menor desprendimiento de CO₂.

Figura 7 Evolución de la temperatura en la pila con aireación forzada y testigo durante el proceso de compostaje

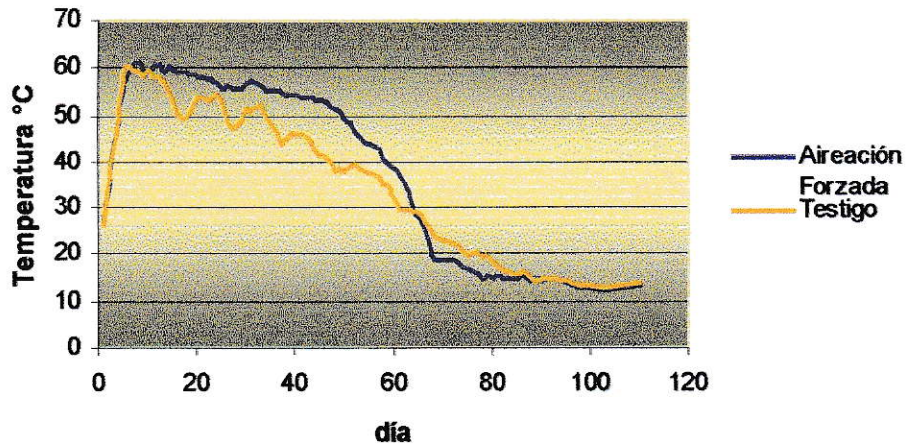


Figura 8 Evolución de la temperatura en las pilas con volteo e incorporación de inóculo

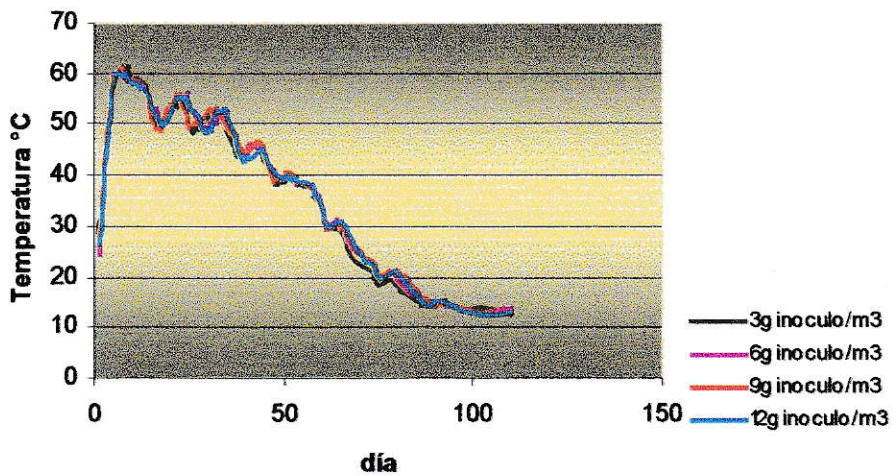


Figura 9 Temperatura de la pila con volteo (testigo) a distintas profundidades

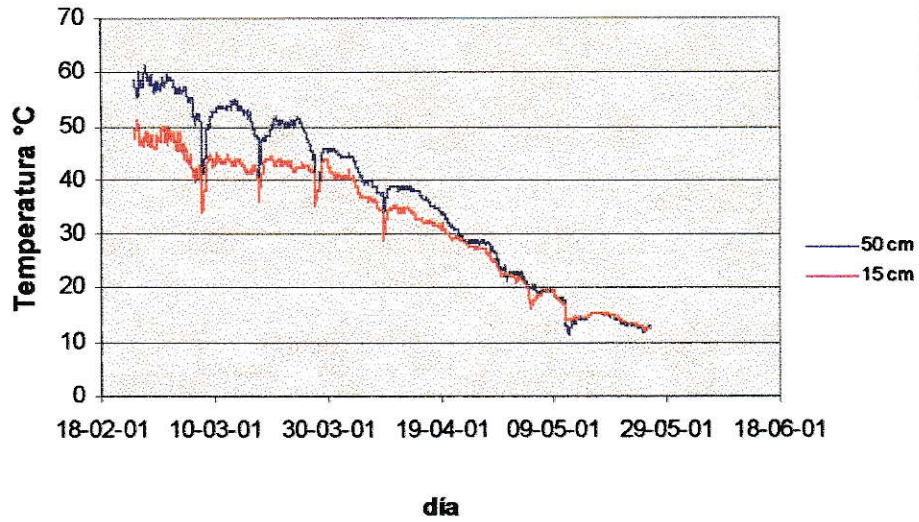


Figura 10 Temperatura de la pila con aireación forzada a distintas profundidades

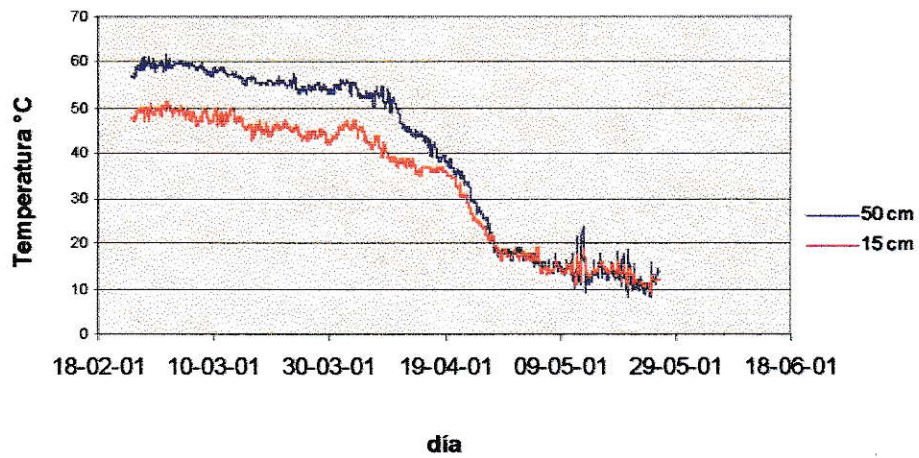




Figura 11 Lombrices encontradas en las pilas durante la etapa de enfriamiento

4.1.2 Humedad

La humedad del material inicial fue similar en todas las pilas, cercana al 51 %. En el compost final disminuyó al 36% en peso de las pilas con volteo y en el producido por aireación forzada la humedad final fue de 29 %. En éste tratamiento la humedad del material se mantuvo siempre más baja que en el resto de los tratamientos debido a la corriente de aire que pasaba a través de la pila, la cual producía un mayor secado del material. Por esta razón, fue necesario humedecer esta pila con mayor frecuencia.

4.1.3 Densidad

La densidad de la mezcla de materiales al comienzo del proceso fue aproximadamente de 0.46 ton/m^3 y para el producto final ésta aumentó en 67 % llegando a 0.77 ton/m^3 . No se observó diferencias en los valores de este parámetro para los distintos tratamientos.

4.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

4.2.1 pH

El pH inicial fue de neutro a ligeramente ácido. Durante los primeros días del proceso, se observa una disminución de éste valor en todos los tratamientos (Figuras 12-17).

La disminución del pH durante los primeros días del proceso se puede deber a la liberación de ácidos orgánicos y ácidos grasos volátiles, producidos por la intensa actividad microbiana. Sin embargo, debido a que las pilas se voltearon frecuentemente no se tuvo problemas significativos de anaerobiosis, ya que en tales condiciones el pH puede volverse mucho más ácido, produciendo la eliminación de muchos microorganismos benéficos en el proceso de descomposición. Por otra parte, tampoco se observó un aumento excesivo de éste, ya que durante el proceso en ninguno de los tratamientos sobrepaso el valor 8,55, lo que podría provocar la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco gaseoso, lo cual implica la presencia de olores desagradables y la disminución de este nutriente fundamental en el producto final.

El análisis correspondiente mostró un incremento de pH durante el proceso en todas las pilas, resultando el valor final entre 7,88 y 8,04 lo cual representa un compost estable. (Tabla 10, Anexo II). No existen diferencias estadísticas significativas entre los distintos tratamientos y el testigo.

La norma de compost establece que un compost clase A debe tener pH entre 7,0 y 8,0 (Apéndice, artículo 6). Al observar los resultados finales se puede constatar que el producto final en la mayoría de los tratamientos se encuentra dentro de este rango. Sin embargo, en dos de los tratamientos correspondientes a la aplicación de 3 y 6 g de inóculo/m³, el pH sobrepasa levemente este valor, lo cual podría corregirse con pequeñas dosis de azufre en forma de sulfato de calcio o ácido sulfúrico.

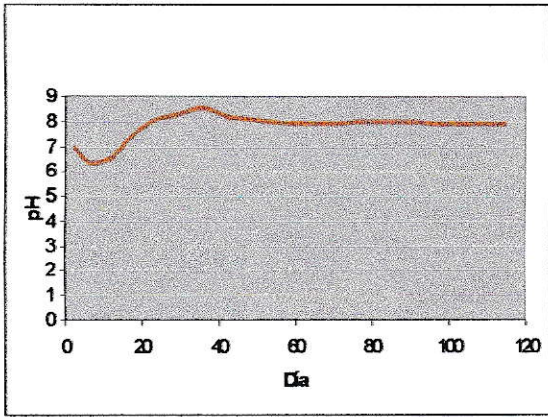


Figura 12. pH de la pila con aireación forzada

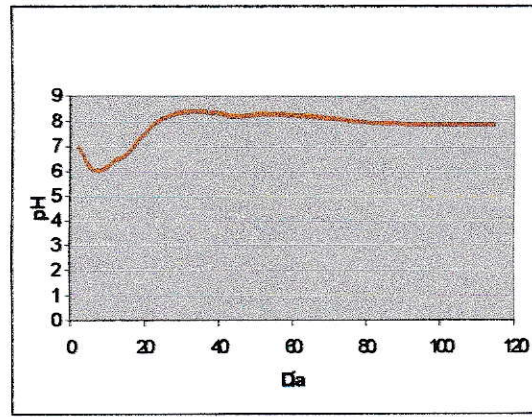


Figura 13. pH de la pila testigo

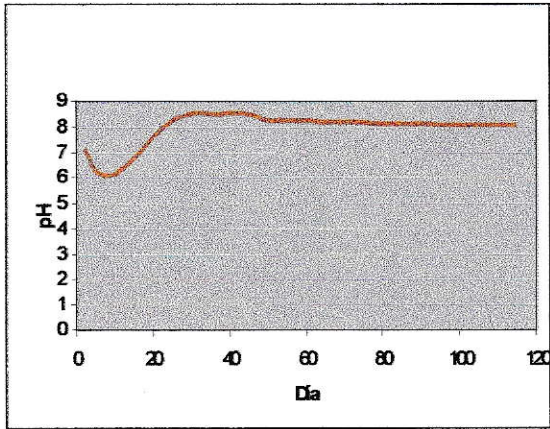


Figura 14. pH de la pila con 3 g de inóculo/m³

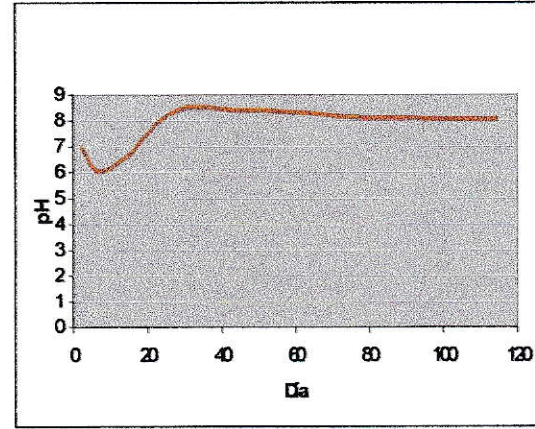


Figura 15. pH de la pila con 6 g de inóculo/m³

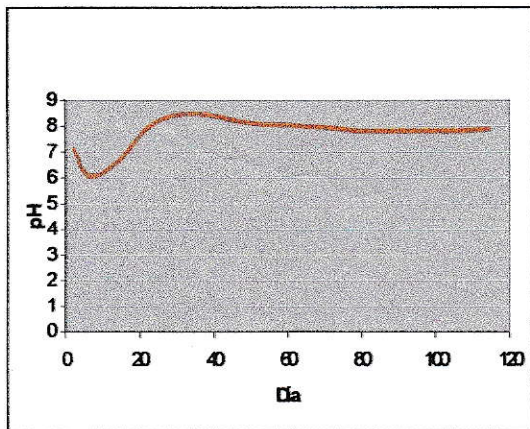


Figura 16. pH de la pila con 9 g de inóculo/m³

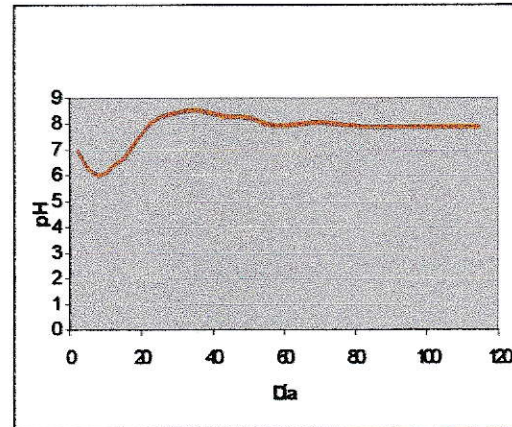


Figura 17. pH de la pila con 12 g de inóculo/m³

4.2.2 Conductividad Eléctrica

En todos los tratamientos la conductividad eléctrica se incrementa en el tiempo (Tabla 11, Anexo II), lo cual puede atribuirse a un efecto de concentración de las sales, puesto que a medida que los materiales orgánicos se van descomponiendo, se va perdiendo masa principalmente en forma CO_2 y H_2O . Por otra parte, el agua de riego de las pilas presentó una conductividad de 6,3 dS/m, lo cual pudo haber contribuido también a este aumento. El lavado de sales desde el material por lluvia fue mínimo, puesto que, cuando se presentaron estas condiciones las pilas se recubrieron con una capa impermeable para evitar de esta forma la lixiviación y el encharcamiento de las pilas.

La conductividad eléctrica de todos los materiales estabilizados se encontró dentro de los parámetros aceptados por la Norma Chilena de Calidad de Compost, la cual establece que para un compost clase A, ésta no debe superar los 5 dS/m, por lo cual no fue necesario realizar un análisis de los iones solubles presentes en el material. Sin embargo, el compost obtenido por aireación forzada presentó una conductividad de 5,07 dS/m, lo cual sobrepasa levemente la norma.

El tratamiento con aireación forzada es estadísticamente distinto al testigo y a los otros tratamientos, presentando una conductividad mayor. Esto se atribuye a que ésta pila tuvo un riego más frecuente debido a que tendía a secarse con mayor facilidad que el resto de las pilas. Por lo tanto, este exceso de sales pudo haber sido aportado por el agua de riego.

4.2.3 Capacidad de Intercambio Catiónico

Los resultados obtenidos muestran que el compost final (Tabla 18, Anexo II) presenta una capacidad de intercambio catiónico considerablemente mayor que el suelo utilizado en el ensayo (Tabla 23, Anexo VI). Se observó que el compost presentó un valor de CIC 89 % mayor que el suelo.

Esta propiedad reviste una gran importancia puesto que consiste en absorber los nutrientes catiónicos del suelo poniéndolos más tarde a disposición de las plantas. De ésta forma se evita la pérdida de los mismos por lixiviación.

4.3 Contenido en macronutrientes y metales pesados

4.3.1 Materia Orgánica

La materia orgánica disminuye con el tiempo debido a las reacciones de descomposición aeróbica que generan desprendimiento de dióxido de carbono y agua.

Los análisis mostraron una disminución en el valor de este parámetro en todos los procesos a medida que transcurre el tiempo de compostaje (Tablas 12-17, Anexo II), disminución que es más pronunciada en las primeras ocho semanas y durante el proceso es mayor en la pila con aireación forzada. En la pila testigo y en la pila con incorporación de 3 g de inóculo/m³ ésta disminución es más lenta que en las pilas con mayor dosis de inóculo, lo cual se puede atribuir a que éstas últimas han recibido una mayor adición de microorganismos que son los encargados de consumir la materia orgánica.

No se observó diferencias estadísticas significativas con respecto al contenido de materia orgánica del producto final entre el testigo y los distintos tratamientos.

4.3.2 Carbono Orgánico Total

El carbono es usado como fuente de energía por los organismos responsables, y se libera en forma de dióxido de carbono, por lo que su valor disminuye con el tiempo. Los análisis reportaron una disminución de un 59 % aproximadamente en el contenido de

carbono en todas las pilas durante el proceso (Tablas 12-17, Anexo II). La disminución de este macroelemento es proporcional a la disminución de materia orgánica.

Cabe destacar los antecedentes aportados por Ciavatta y col. (1989) acerca de la inconveniencia de aplicar el método de combustión húmeda de Walkey y Black para determinar carbono en compost y otros materiales orgánicos, por lo tanto se utilizó el método de calcinación a 600 °C.

4.3.3 Nitrógeno

En general, se observa que el contenido de nitrógeno total para el compost final aumenta o disminuye levemente en los distintos procesos, por lo que se podría afirmar que el contenido de nitrógeno se mantiene prácticamente estable en el tiempo (Tablas 12-17, Anexo II). Esto se consigue mezclando las materias primas iniciales de forma tal que se obtenga una relación C/N cercana a 30 y controlando que el pH durante el proceso no supere el valor 9, ya que ambos factores pueden producir una pérdida de nitrógeno a la atmósfera en forma de amoníaco.

El análisis estadístico mostró que el material obtenido por aireación forzada y la pila testigo son significativamente distintos al resto de los tratamientos con respecto al contenido de nitrógeno total. En el primero, se pudo constatar un mayor contenido de nitrógeno total, lo cual se puede deber a las mejores condiciones de oxigenación y en el segundo, el contenido de nitrógeno es más bajo que el resto de los tratamientos, posiblemente por la menor cuantía de microorganismos presentes capaces de retener este nutriente.

El compost presentó un contenido promedio de nitrógeno disponible siete veces mayor que el suelo (Tablas 18 y 23). Este suelo presentó una baja disponibilidad de nitrógeno mineral.

4.3.4 Relación Carbono-Nitrógeno

En la figura 18 se observa que la relación C/N va disminuyendo a medida que transcurre el tiempo, hasta hacerse constante. Éste parámetro se utilizó para establecer el estado de degradación del material en los distintos tratamientos.

En la pila con aireación forzada la relación C/N se estabilizó a las 9 semanas aproximadamente. En las pilas con incorporación de inóculo se observó que la estabilización se produjo a las 10 semanas, con excepción de la pila con menor dosis de inóculo (3 g/m^3), la cual se estabilizó a las 13 semanas aproximadamente al igual que la pila testigo.

La relación carbono/nitrógeno para todas las pilas de compost al finalizar el proceso varió entre 12,31 y 13,13, lo cual representa un compost estable (Tablas 12-17, Anexo II).

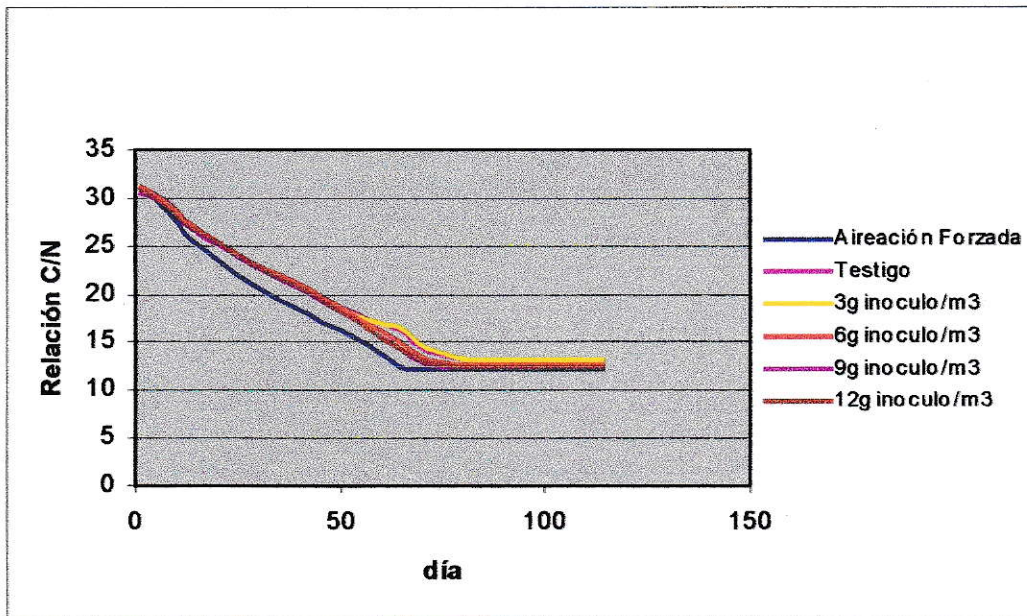


Figura 18 Relación Carbono-Nitrógeno en los distintos tratamientos

4.3.5 Potasio

El contenido de potasio disponible obtenido en los composts varió entre 3333 a 3474 mg . kg⁻¹ (Tabla 18, Anexo II). Según Polo (1991) en el compost prácticamente la totalidad de este nutriente se encuentra en forma inorgánica, especialmente como cloruro, y al ser adicionado al suelo puede ser asimilado por los cultivos o bien puede perderse por lixiviación. Por lo tanto, queda claro que, el valor como fertilizante potásico en el compost es relativamente bajo, pero es fácilmente asimilable por las plantas.

4.3.6 Fósforo

El fósforo es un nutriente esencial para el desarrollo de las plantas y generalmente su contenido en el suelo es bajo. El producto obtenido en el proceso de compostaje (Tabla 18, Anexo II) revela una marcada diferencia en cuanto al contenido de fósforo disponible con respecto al suelo (Tabla 23, Anexo VI). El compost presentó un contenido promedio de P disponible de 362 mg . kg⁻¹, lo cual es un contenido alto y considerablemente mayor que el observado en el suelo, donde se encuentra una concentración muy baja de sólo 2 mg . kg⁻¹.

4.3.7 Metales Pesados

Como se aprecia en la Tabla 19 (Anexo III), el contenido de metales pesados no excede los niveles aceptables para llegar a ser tóxicos (Apéndice, artículo 4), sino que se encuentran a nivel de micronutrientes. Estos elementos desempeñan un importante papel en el metabolismo de los microorganismos involucrados en el proceso de compostaje y también son esenciales para la nutrición, desarrollo y reproducción de las plantas. Estos resultados eran previsibles, puesto que las materias primas que se estaban utilizando para el proceso eran sólo materiales de origen vegetal, en los cuales estos metales se encuentran sólo a nivel traza.

4.4 Microorganismos patógenos

Uno de los factores más importantes para la destrucción de los microorganismos patógenos es la temperatura, pues tal como se puede observar en la Tabla 1 (cap. II), muchos de ellos son incapaces de sobrevivir a temperaturas de 55-60 °C por más de 30-60 minutos.

De acuerdo a las temperaturas alcanzadas en los distintos procesos, cabe esperar que la presencia de estos agentes patógenos no sea significativa, lo cual se puede corroborar en los resultados obtenidos (Tabla 20, Anexo IV), donde se observa que el nivel Coliformes Fecales varía de 15 a 70 NMP encontrándose bajo el límite de lo especificado en la norma de compost (Apéndice, artículo 1) y no se detecta presencia de Salmonella en ninguno de los tratamientos.

4.5 Ensayo de invernadero

La germinación de las plantas comenzó a los 3 días de iniciado el ensayo y se extendió hasta el séptimo día. No se observó diferencia significativa en el porcentaje de germinación de las plantas entre los distintos tratamientos. (Tabla 21, AnexoV)

A partir del día 21 se empieza a observar una diferencia significativa en el crecimiento de las plantas en los distintos tratamientos (Tabla 22, Anexo V). En los resultados se puede constatar que hasta el día 55, la velocidad de crecimiento foliar de las plantas aumenta a medida que hay una mayor proporción de compost en el sustrato (Figura 19). Sin embargo, después ésta tendencia cambia y el área foliar para los distintos tratamientos (suelo/compost) aumenta en el siguiente orden: 100 % suelo, 25/75, 100% compost, 75/25 y 50/50. Estos resultados, indican que compost es un excelente sustrato para las plantas de lechuga, puesto que es una fuente rica en nutrientes, pero es recomendable mezclarlo con suelo para así obtener el crecimiento óptimo.

Se estableció que la proporción 50/50 es la que presenta mejores resultados en cuanto al crecimiento, obteniéndose plantas con más del doble del área foliar que las que se plantaron en suelo sin mezclar (Figura 20).

Todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticamente significativas.

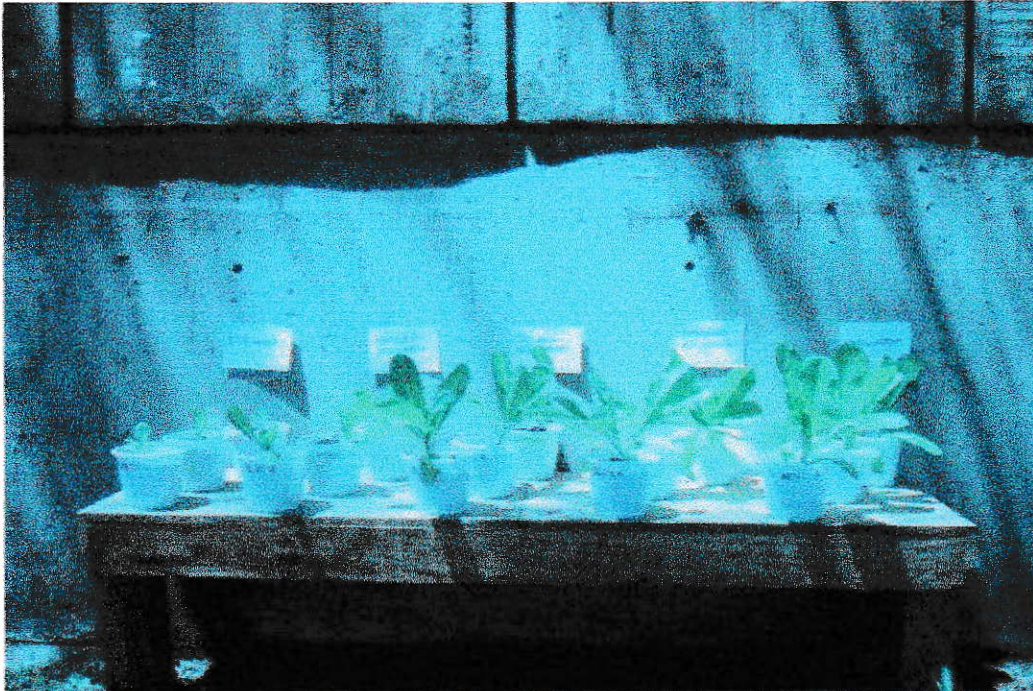


Figura 19 Lechugas plantadas en sustrato suelo-compost en distintas proporciones

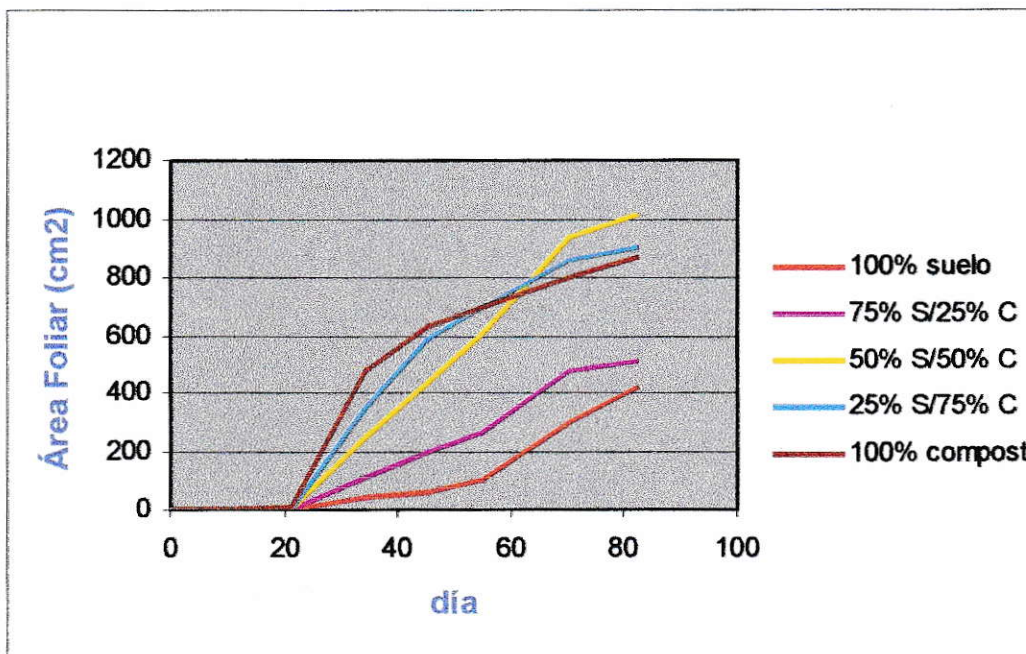


Figura 20 Expansión del área foliar de las plantas de lechuga

4.6 Análisis de costos

A continuación se presenta el análisis de costos considerando las siguientes formas de trabajo: volteos con utilización de maquinaria (con y sin incorporación de inóculo), volteos manuales (con y sin incorporación de inóculo) y sistema con aireación forzada.

A efectos de calcular el costo de producción por tonelada de compost, se ha considerado una producción anual estimada según el tiempo que se requirió en los distintos procesos para obtener un compost maduro, tomando como base a la disponibilidad del área habilitada para tal fin, la cual tiene una dimensión de 600 m².

Es necesario indicar que los costos pueden incrementarse considerablemente, puesto que no se consideró el valor del terreno donde se emplazó la planta piloto.

El análisis de costos en todos los casos está expresado por tonelada de producto y se considera un valor residual de 40%.

4.6.1 Producción con utilización de maquinaria sin incorporación de inóculo

4.6.1.1 Costos de Inversión

- Infraestructura (habilitación de área) = \$ 1.992.130
- Tiempo de depreciación = 10 años
- Producción anual de compost = 362 ton
- Costo de inversión por tonelada = $\frac{1.195.278}{10 \times 362} = \$ 330$

4.6.1.2 Costos de operación

4.6.1.2.1 Personal

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Trabajador	h-h	7,78	1.250	9.723	9.723

4.6.1.2.2 Herramientas e insumos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Pala	U	0,015	2.900	43,50	
Horqueta	U	0,015	7.350	110,25	
Rastrillo	U	0,015	7.245	108,68	
Carretilla	U	0,007	16.980	118,86	
Agua Potable	m ³	0,363	200,06	72,65	
Electricidad	KWH	2,42	51,85	125,53	579

4.6.1.2.3 Equipos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Pala mecánica	h-m	0,5	20.000	10.000	10.000

Costo de operación por tonelada = 9.723 + 579 + 10.000

Costo de operación por tonelada = \$20.302

4.6.1.3 Costos administrativos

Gastos administrativos = 15% (Costo de operación)

Gastos administrativos = 0.15 x 20.302

Gastos administrativos por tonelada = \$ 3.045

Entonces:

Costo total por tonelada = Costos de inversión + Costos de operación +
Costos administrativos

Costo total por tonelada = 330 + 20.302 + 3.045

Costo total por tonelada = \$ 23.677

4.6.2 Producción con utilización de maquinaria con incorporación de inóculo (6 g/m³)

4.6.2.1 Costos de Inversión

- Infraestructura (habilitación de área) = \$ 1.992.130
- Tiempo de depreciación = 10 años
- Producción anual de compost = 444 ton
- Costo de inversión por tonelada = $\frac{1.195.278}{10 \times 444} = \269

4.6.2.2 Costos de operación

4.6.2.2.1 Personal

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Trabajador	h-h	6,49	1.250	8.110	8.110

4.6.2.2.2 Herramientas e insumos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Pala	U	0,015	2.900	43,50	
Horqueta	U	0,015	7.350	110,25	
Rastrillo	U	0,015	7.245	108,68	
Carretilla	U	0,007	16.980	118,86	
Inoculo	Gramo	18,95	23,04	436,61	
Agua Potable	m ³	0,296	200,06	59,39	
Electricidad	KWH	1,97	51,85	102,34	979

4.6.2.2.3 Equipos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Pala mecánica	h-m	0,50	20.000	10.000	10.000

Costo de operación por tonelada = 8.110 + 979 + 10.000

Costo de operación por tonelada = \$ 19.089

4.6.2.3 Costos administrativos

Gastos administrativos = 15% (Costo de operación)

Gastos administrativos = 0,15 x 19.089

Gastos administrativos por tonelada = \$ 2.863

Costo total por tonelada = 269 + 19.089 + 2.863

Costo total por tonelada = \$ 22.221

4.6.3 **Producción vía volteo manual sin incorporación de inóculo**

4.6.3.1 Costos de Inversión

- Infraestructura (habilitación de área) = \$ 1.992.130
- Tiempo de depreciación = 10 años
- Producción anual de compost = 362
- Costo de inversión por tonelada = 1.195.278 = \$ 330
10 x 362

4.6.3.2 Costos de operación

4.6.3.2.1 Personal

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Trabajador	h-h	11,46	1.250	14.325	14.325

4.6.3.2.2 Herramientas e insumos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Pala	U	0,030	2.900	87,00	
Horqueta	U	0,030	7.350	220,50	
Rastrillo	U	0,030	7.245	217,35	
Carretilla	U	0,014	16.980	237,72	
Agua Potable	m ³	0,363	200,06	72,65	
Electricidad	KWH	2,42	51,85	125,53	961

Costo operacional por tonelada = 14.325 + 961

Costo operacional por tonelada = \$ 15.286

4.6.3.3 Costos administrativos

Gastos administrativos = 15% (Costo de operación)

Gastos administrativos = 0,15 x 15.286

Gastos administrativos por tonelada = \$2.293

Costo total por tonelada = 330 + 15.286 + 2.293

Costo total por tonelada = \$ 17.909

4.6.4 Producción vía volteo manual con incorporación de inóculo (6 g/m³)

4.6.4.1 Costos de Inversión

- Infraestructura (habilitación de área) = \$ 1.992.130
- Tiempo de depreciación = 10 años
- Producción anual de compost = 444 ton
- Costo de inversión por tonelada = 1.195.278 = \$ 269
10 x 444

4.6.4.2 Costos de operación

4.6.4.2.1 Personal

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Trabajador	h-h	10,17	1.250	12.713	12.713

4.6.4.2.2 Herramientas e insumos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Pala	U	0,030	2.900	87,00	
Horqueta	U	0,030	7.350	220,50	
Rastrillo	U	0,030	7.245	217,35	
Carretilla	U	0,014	16.980	237,72	
Inoculo	gramo	18,95	23,04	436,61	
Agua Potable	m ³	0,296	200,06	59,39	
Electricidad	KWH	1,97	51,85	102,34	1.123

Costo operacional por tonelada = 12.713 + 1.123

Costo operacional por tonelada = \$ 13.836

4.6.4.3 Costos administrativos

Gastos administrativos = 15% (Costo de operación)

Gastos administrativos = $0,15 \times 13.836$

Gastos administrativos por tonelada = 2.075

Costo total por tonelada = $269 + 13.836 + 2.075$

Costo total por tonelada = \$ 16.180

4.6.5 **Producción con utilización de sistema de aireación forzada**

4.6.5.1 Costos de Inversión

- Infraestructura (habilitación de área) = \$ 4.427.161
- Tiempo de depreciación = 10 años
- Producción anual de compost = 490 ton
- Costo de inversión por tonelada = $\frac{2.656.296,6}{10 \times 490} = \$ 542$

4.6.5.2 Costos de operación

4.6.5.2.1 **Personal**

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Trabajador	h-h	6,57	1.250	8.214	8.214

4.6.5.2.2 Herramientas e insumos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$	COSTO PARCIAL \$	COSTO TOTAL \$
Pala	U	0,015	2.900	43,50	
Horqueta	U	0,015	7.350	110,25	
Rastrillo	U	0,015	7.245	108,68	
Carretilla	U	0,007	16.980	118,86	
Agua Potable	m ³	0,268	200,06	53,62	
Electricidad	KWH	3.281	51,85	170,12	605

4.6.5.3 Costos administrativos

Gastos administrativos = 15% (Costo de operación)

Gastos administrativos = 0,15 x 8.819

Gastos administrativos por tonelada = 1.323

Costo total por tonelada = 542 + 8.819 + 1.323

Costo total por tonelada = \$ 10.684

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES

- El material obtenido en los distintos tratamientos cumple con los estándares de calidad de compost establecidos en la Propuesta de Norma de Compost de CONAMA, lo cual permite clasificarlo como compost clase A.
- Las temperaturas alcanzadas en la fase termofílica y la extensión de ésta, permiten asegurar que hubo una destrucción efectiva de microorganismos patógenos.
- El producto obtenido presenta un alto contenido de nutrientes, los cuales se encuentran en concentraciones claramente superiores a las encontradas normalmente en suelos.
- La aireación forzada y en menor medida el volteo manual con inóculo reducen el tiempo de estabilización del compost.
- La concentración de inóculo óptima para acelerar el proceso de compostaje fue de 6 g/m^3 .
- A la escala de este trabajo, el sistema de producción con volteo manual reporta un costo menor que la producción con utilización de maquinaria pesada (pala frontal). La producción con utilización de inóculo/ m^3 reduce los costos de producción. El sistema con aireación forzada es el que presenta el menor costo de producción. Sin embargo, este sistema tiene un alto costo inicial en infraestructura.
- Los bioensayos en invernadero mostraron que el compost acelera la velocidad de crecimiento de las plantas de lechuga, característica que le da una interesante proyección como sustrato para viveros.
- Se observó que la proporción 50% suelo-50 % compost era la óptima para el crecimiento de la lechuga.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

VI. BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, R. C., F. S. MacLEAN, J.K.DIXON, F. M. BENNET, G. J. MARTIN, y R. C. LOUGH. 1951. The utilization of organic wastes in N.Z. Second interim report of the inter-departmental committee. New Zealand Engineering. Pp. 396-424.

ALEXANDER, M. 1961. Introduction to Soil Microbiology. Wiley, New York.

BASAGLIA, M., G. CONCHERI, S. CARDINALI, M. B. PASTI-GRISBY y NUTI. 1992. Enhanced degradation of ammonium-pretreated wheat straw by lignocellulosic *Streptomyces* spp. Canadian Journal of Microbiology. Rev. 38(10): 1022-1025.

BENISTANT, D. 1978. Caracterisation de la maturité des composts d'ordures ménagères. Tesis doctoral, Ecole National d'ingenierus des Travaux Agricoles. Dijon, 38p.

BREMNER, J. (1965). Total Nitrogen. En: BLACK, C.A., ed. Methods of Soil Analysis. Madison, American Society of Agronomy v.2. pp: 1149-1178.

CANTANHEDE, A., G. MONGE y G. WHARWOOD. 1993. Compostaje de residuos de mercado. Lima. Pp. 25-26.

CIAVATTA C., L. ANTISARI y P. SEQUI. 1989. Determination of organic carbon in soils and fertilizers. Commun. En Soil Science Plant Anal 20 Rev. 7-8: 759-773.

CLAIRON, M., ZINSOU, C. y NAGOUD, D. 1982. Etude des possibilités d'utilisation agronomique des composts d'ordures ménagères en milieu tropical. I. Compostage des ordures ménagères. Agronomie Rev. 2: 295-300.

COMISIÓN NACIONAL del MEDIO AMBIENTE. 2000., Norma de Calidad de Compost. (Propuesta de Trabajo).

CRAWFORD, D. L. 1986. The role of actinomycetes in the decomposition of lignocellulose. FEMS Symp. Rev. 34: 715-728.

DARST, B., y L. MURPHY. 1990. Soil Organic Matter. An integral ingredient in crop production. Better Crops with Plant Food 74 Rev. 1: 10-11.

De BERTOLDI, M., G. VALLINI y A. PERA. 1983. The biology of composting: A Review: Waste Management. Rev. 1: 156-176.

DICKSON, N., T. RICHARD, y R. KOZLOWSKI. 1991. Composting to Reduce the Waste Stream: A Guide to Small Scale Food and Yard Waste Composting. Available from the Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cornell University, 152 Riley-Robb Hal, Ithaca, NY 14853; Pp. 607, 255, 7654.

FAO. FOOD AGRICULTURAL ORGANIZATION. 1977. China: reciclaje de desechos orgánicos en la agricultura. Boletín de Suelos N° 40. Roma. 95 p.

FRANKERBERGER, W. y DICK, W. 1983. Relationships between enzyme activities indices in soil. Soil. Science. Soc. Am. J. Rev. 47: 135-143

FINSTEIN, M. S., MORRIS, M. L., y STROM, P. F. 1980. Microbial ecosystem responsible for anaerobic digestion and composting. J. Water Pollut. Control Fed. Rev. 52: 2675-85.

GODDEN, B. 1986. Les test enzymatiques et chimiques de maturité des composts. Compost Information Rev. 22: 20-24

GOLUEKE, C. G. 1972. Composting: A Study of the Process and its Principles. Rodale Press, Emmaus. Penn Ed.

GOLUEKE, C. G. 1982. Composting: A Review of Rationale Principles and Public Health. In Composting: Theory and Practice for City, Industry and Farm. JG Press, Emmaus. Pp. 19-25.

GOTAAS, H. B. 1956. Composting; Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes. Geneva; World Health Organization.

GRAY, K. R. y K. SHERMAN. 1970. Public Cleansing Rev., 60(7): 343-354.

HAMMOUDA, G. H y W. A. ADAMS. 1989. The decomposition, humification and fate of nitrogen during the composting of some plant residues. Pp. 245-253. In: Compost Production, Quality and Use. M. De Bertoldi, M. P. Ferranti, P. L'Hermite, and F. Zucconi (eds.): Elsevier Applied Science. London. 853p.

HAUG, R. T. 1979. Engineering Principles of Sludge Composting. J Water Pollut. Control Fed. Rev. 51: 2189-206.

HAUG, R. T. 1980a. Compost Engineering: Principles and Practice. Ann Arbor Science, Michigan.

HAUG, R. T. 1980b. Organic Waste Recycling, 2nd edition, 85p.

HAUG, R. T. 1993. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, Boca Raton , FL. Pp. 411, 717.

JANN, G., HOWARD, D y SALLE, A. 1959. Method for the determination of completion of composting. Compost Science. Rev. 14: 8-15

JUSTE, C y POMEL. 1977. La valorisation agricole des déchets. I. Les compost urbain. Ministère de la Culture et de l' Environnement. Ministère de l' Agriculture. 75p.

JUSTE, C. 1980. Avantages et inconvénients de l' utilisation des compost d' ordures ménagères comme amendement organique des sols ou support. Journadas Internacionales sobre el Compost. Madrid.

KIRK, T. K. y FARRELL. 1987. Enzymatic "combustion": The Microbial Degradation of Lignin. *Annu. Microbiol. Rev.* 41: 465-505.

LACHICA, M., RECALDE, L y ESTEBAN, E. 1965. Análisis foliar. Métodos analíticos utilizados en la Estación Experimental Zaidún. *Anales de Edafología y Agrobiología* 24 (9-10):589-610.

LADISH, M. R., K. W. LIN, M. VOLOCH, y G. T. TSAO. 1983. Process Considerations in the Enzymatic Hydrolysis of Biomass. *Enzyme Microb. Technol. Rev.* 5(2): 82-102.

LOSSIN, R. 1971. Compost studies. Part III. Disposing of animal wastes measurement of the chemical oxygen demand of compost. *Compost Science. Rev.* 12: 31-32.

LYNCH, J. M. y D. A. WOOD. 1985. Controlled Microbial Degradation of Lignocellulose: the basis for existing and novel approaches to composting, In: *Composting of Agricultural and Other Wastes* . J. K. R. Gasses (ed.). Elsevier Applied Science. Pp. 183-193.

LYNCH, J. M. 1992. Substrate availability in the production of compost. *Proceedings of the International Composting Research Symposium. II.* A. J. Hoiting and H. Keener (Editors). Pp. 24-35.

McKINLEY, V. L. y VESTAL, J. R. 1984. Biokinetic analyses of adaption and succession: microbial activity in composting municipal sewage sludge. *App. Environ. Microbiol. Rev.*, 47: 933-997

McKINLEY, V. L., VESTAL, J. R., and ERALP, A. E. 1985. Microbial activity in composting. *Biocycle Rev.*, 26: 47-50.

METCALF y EDDY, Inc. 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd edition. McGraw-Hill, New York.

MONTGOMERY, D. C. 1991. *Disño y Análisis de Experimentos*. Pp: 67-69.

NOGALES, R., GALLARDO-LARA y DELGADO, M. 1982. Aspectos físico-químicos y microbiológicos del compost de basura urbana. *Anal. Edaf. Y Agrobiol. Rev.* 41: 1159-1174

OLSEN, S y DEAN, L. 1965. Phosphorus. In: **BLACK, C. A.** *Methods of Soil Analysis*. Madison, American Society of Agronomy v. 2. Pp: 1035-1048.

PEREIRA-NETA, J. T. 1987. On the treatment of municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting-a low cost technology approach. PhD. dissertation. Leeds University, U.K.

POINCELOTT, R. 1992. The biochemistry and methodology of composting. *Connecticut Agric. Exp. Sta. Bull.* 727. New Haven. Connecticut.

POLO, A., COSTA F. y HERNANDEZ T. 1991. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. Pp 135-149

POLPRASERT, C., WANGSUPHACHART, S., y MUTTAMARA, S. 1980. Composting nightsoil and water hyacinth in the tropics. *Compost Science/Land Utilization Rev.* 21: 25-7.

RICHARD, T. L. 1992. Municipal Solid Waste Composting: Physical and Biological Processing Biomass and Bioenergy *Rev.* 3(3-4): 163-180.

SATRIANA, M. J. 1974. Large scale composting. Park Ridge. Noyes; Data Corporation.

SCHEFLER, W. 1981. Bioestadística. Fondo Educativo Interamericano. México. 267 p

SMITH, T y GUILD, J. 1931. The C.I.E colorometric standars and their use. *Trans. Opt. Soc.* Pp 73-134

SPOHN, E. 1978. Determination compost maturity. *Compost Science. Rev.* 19: 26-27

STROM, P. F. 1985. Identification of thermophilic bacteria in solid-waste composting. *Appl. Environ. Microbiol. Rev.*, 50: 906-13.

SUGAHARA, K., KOGA, y INOKO, A. 1973. Color change of straw during composting. *Soil Science Plant. Nutr.* 30 Pp 163-173.

TRAUTMANN, N. 1998 (November). *Cals news.* Cornell University. Volume 5, Issue 3.

VAN SOEST, P. J. 1994. *The Nutritional Ecology of the Ruminant*, 2nd edition. Cornell University Press. Ithaca, NY. 476p.

VOGTMANN, H., FRICKE y T. TURK. 1993. Quality, physical characteristics, nutrient content, heavy metals and organic chemicals in biogenic waste composts. *Compost Science and Utilization*, 1 Rev. 4: 69-87.

WALPOLE, R. y MYERS, R. 1987. Probabilidad y estadística para ingenieros. 3^a edición . Nueva editorial Interamericana. México. 733 p.

WALTER E., J.M. LOPEZ-REAL y D.L. COFFEY. 1992. Composting of sewage sludge and straw: laboratory scale simulation and evaluation of selected temperatures and effect on composting performance. *Acta Horticulturae Rev.*(302):113-124.

ANEXOS

ANEXO I
MEDICIONES DE TEMPARATURA EN LAS PILAS DE COMPOST

Tabla 8 Temperatura media de las pilas durante el proceso

Día	Aireación forzada T °C	Testigo T °C	Volteo con 3g inoc/m ³ T °C	Volteo con 6g inoc/m ³ T °C	Volteo con 9g inoc/m ³ T °C	Volteo con 12g inoc/m ³ T °C
1	27.6	26.3	27.7	24.2	28.6	26.6
2	32.6	33.8	30.3	31.9	33.0	29.4
3	44.6	43.7	46.2	45.6	44.7	45.0
4	50.0	50.4	53.6	52.4	52.3	53.7
5	56.6	58.7	58.8	59.8	56.6	57.7
6	58.8	60.6	60.1	59.7	59.8	60.3
7	60.6	59.8	61.4	60.0	60.2	59.6
8	60.9	59.4	59.6	58.3	59.8	60.1
9	59.0	58.4	58.5	59.0	61.1	58.3
10	59.4	59.6	59.0	58.3	58.7	57.8
11	60.3	58.3	57.8	57.9	59.1	58.2
12	60.8	58.4	57.9	58.3	57.6	56.9
13	59.4	57.4	57.5	56.6	57.9	57.3
14	59.9	55.4	54.8	55.3	55.0	55.2
15	59.7	53.4	51.3	52.4	53.2	53.6
16	59.2	50.1	49.1	52.8	51.3	51.4
17	59.0	49.2	48.9	49.5	49.4	50.8
18	58.7	50.0	49.9	49.9	49.9	49.7
19	58.7	52.0	52.8	51.9	52.8	50.5
20	58.1	53.8	53.9	53.2	54.1	52.6
22	57.8	53.2	55.6	55.9	53.6	55.3
23	57.4	53.7	53.5	55.4	54.0	54.8
24	56.7	54.0	51.6	56.0	52.9	55.4
25	55.9	52.6	49.4	53.6	50.1	53.1
26	56.0	50.0	50.2	52.2	48.5	52.4
27	55.5	47.4	50.0	50.1	49.2	51.5
29	55.8	48.8	51.6	49.2	48.7	48.5
30	56.6	51.4	53.1	49.6	50.3	49.3
31	57.0	50.9	52.5	50.5	51.9	49.0
32	56.9	51.8	52.9	50.0	51.1	52.6
33	56.3	51.6	51.6	52.3	51.7	52.4

(Continuación) Tabla 8 Temperatura media de las pilas durante el proceso

Día	Aireación forzada T °C	Testigo T °C	Volteo con 3g inoc/m ³ T °C	Volteo con 6g inoc/m ³ T °C	Volteo con 9g inoc/m ³ T °C	Volteo con 12g inoc/m ³ T °C
34	55.4	49.6	50.4	51.6	50.0	52.8
36	55.2	46.1	48.2	48.6	46.9	49.2
37	54.9	44.1	47.9	47.4	45.8	47.4
38	54.4	45.1	45.9	45.0	43.9	44.8
39	54.3	45.9	44.5	43.9	44.5	42.9
40	54.0	45.6	45.1	44.5	45.1	43.7
41	53.5	45.8	45.3	46.0	45.8	43.2
43	53.8	44.3	46.4	45.2	45.3	44.9
44	53.1	42.3	45.6	45.6	45.1	45.0
45	53.2	41.6	43.8	44.1	43.0	43.8
46	52.6	40.8	40.8	41.7	41.9	41.9
47	51.8	39.9	38.7	41.1	41.0	40.7
48	51.3	37.9	39.2	40.2	38.3	40.1
49	50.7	38.4	39.6	39.7	38.9	39.6
50	49.5	38.2	40.0	39.2	38.6	39.2
51	48.4	38.7	40.5	39.6	39.5	39.9
52	46.3	39.5	40.1	40.0	39.9	39.0
53	45.4	38.3	38.6	38.4	39.6	39.5
54	44.4	37.9	38.1	38.6	38.7	38.9
57	42.8	36.6	37.7	37.5	37.3	38.0
58	40.4	35.0	36.2	36.6	36.1	36.5
59	39.2	34.6	34.9	35.8	35.2	35.6
60	38.4	31.7	32.3	33.0	32.4	32.8
61	37.2	29.4	29.4	30.4	29.5	30.1
63	33.6	29.6	30.1	31.0	29.8	30.5
64	29.8	29.0	30.5	31.2	29.3	30.9
65	27.4	28.6	30.4	29.7	28.9	30.7
66	25.6	27.1	29.6	28.9	27.6	29.8
67	22.9	25.7	28.2	27.1	26.0	28.5
68	19.1	24.2	27.2	26.0	24.1	27.0
71	18.6	22.9	23.9	24.0	22.2	23.5

(Continuación) Tabla 8 Temperatura media de las pilas durante el proceso

Día	Aireación forzada T °C	Testigo T °C	Volteo con 3g inoc/m ³ T °C	Volteo con 6g inoc/m ³ T °C	Volteo con 9g inoc/m ³ T °C	Volteo con 12g inoc/m ³ T °C
73	18.3	21.9	22.8	22.9	21.4	22.5
74	17.5	20.8	22.0	21.6	19.7	21.4
75	16.8	19.6	20.1	20.1	18.4	19.9
77	15.9	20.1	20.8	20.9	19.0	20.3
78	14.7	19.3	21.2	21.2	19.2	20.7
79	15.3	19.7	20.9	20.8	18.7	21.0
80	15.0	18.0	21.1	19.2	18.3	20.7
81	15.1	17.5	20.3	18.5	17.0	20.0
82	14.9	17.0	19.6	17.4	16.6	18.8
85	14.7	15.9	16.9	16.1	15.3	15.9
86	15.2	16.2	15.7	15.5	14.8	15.2
87	14.6	15.6	15.1	15.8	14.4	14.7
88	14.3	14.9	15.4	15.2	14.7	14.3
89	14.9	14.3	14.6	14.7	14.5	14.9
90	14.4	15.0	14.5	15.1	14.9	15.0
93	14.7	14.8	14.9	14.5	15.2	14.8
96	13.4	13.8	13.8	13.7	13.5	13.4
103	12.1	12.8	13.1	12.9	13.8	12.4
110	13.2	13.6	12.9	13.7	12.4	12.9

Tabla 9 Temperatura atmosférica durante el período de compostaje

Mes	T° máxima °C	T° mínima °C	T° media °C	Precipitación mensual (mm)
Enero	26.6	11.2	18.9	0.0
Febrero	27.8	12.4	20.1	0.0
Marzo	26.9	10.8	18.9	11.5
Abril	19.6	6.3	13.0	20.5
Mayo	16.1	4.4	10.3	41.7
Junio	15.5	2.9	9.2	1.3

Fuente: Estación Meteorológica La Platina-INIA

ANEXO II
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

Tabla 10 pH de las pilas durante el proceso

Día	Aireación forzada	Testigo	Volteo con 3g inoc/m ³	Volteo con 6g inoc/m ³	Volteo con 9g inoc/m ³	Volteo con 12g inoc/m ³
2	6,93	6,96	7,04	6,94	7,03	6,97
4	6,58	6,34	6,40	6,37	6,35	6,39
6	6,33	6,08	6,11	6,04	6,06	6,12
8	6,29	6,05	6,07	6,06	6,03	6,02
10	6,41	6,23	6,14	6,18	6,20	6,13
12	6,56	6,48	6,39	6,41	6,43	6,42
15	7,11	6,69	6,77	6,73	6,76	6,69
22	7,96	7,86	7,94	7,89	7,95	7,99
29	8,28	8,35	8,46	8,48	8,41	8,42
36	8,51	8,42	8,49	8,54	8,46	8,53
43	8,18	8,23	8,55	8,39	8,29	8,31
50	8,05	8,27	8,23	8,43	8,12	8,23
57	7,95	8,31	8,22	8,38	8,05	7,94
64	7,94	8,26	8,19	8,27	8,01	7,98
71	7,94	8,11	8,15	8,17	7,93	8,05
78	7,99	7,98	8,12	8,14	7,85	7,96
85	7,97	7,93	8,10	8,12	7,84	7,88
99	7,95	7,86	8,06	8,06	7,82	7,88
114	7,95	7,88	8,02	8,04	7,88	7,89

ANDEVA para pH del producto final (día 114)

FV	S.C	g.l.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	0,0789	5	0,0158	2,44	3,11
Error	0,0776	12	0,00647		
Total	0,1565	17			

Tabla 11 Conductividad eléctrica de las pilas durante el proceso (dS/m)

Día	Aireación forzada	Testigo	Volteo con 3g inoc/m ³	Volteo con 6g inoc/m ³	Volteo con 9g inoc/m ³	Volteo con 12g inoc/m ³
2	2,98	2,71	2,83	2,92	3,01	2,89
4	2,99	2,73	2,79	2,99	2,98	2,88
6	2,93	2,76	2,89	2,93	2,97	2,99
8	2,97	2,95	2,96	3,01	3,09	3,06
10	3,07	3,10	3,13	3,06	3,05	2,99
12	3,12	3,19	3,24	3,19	3,23	3,15
15	3,29	3,31	3,23	3,25	3,39	3,11
22	3,73	3,41	3,54	3,41	3,48	3,32
29	3,83	3,49	3,68	2,98	3,62	3,88
36	4,15	3,71	3,84	3,01	3,84	4,15
43	4,75	3,97	3,91	3,27	4,07	4,14
50	4,63	4,21	4,22	3,48	4,38	4,01
57	5,11	4,47	4,28	3,61	4,46	3,97
64	5,17	4,74	4,54	3,96	4,53	4,04
71	5,31	4,89	4,65	4,21	4,61	4,35
78	5,38	4,96	4,71	4,49	4,58	4,57
85	5,29	4,92	4,74	4,51	4,59	4,62
99	5,16	4,78	4,76	4,63	4,63	4,71
114	5,07 ^(*)	4,78	4,80	4,77	4,72	4,74

Valores con ^(*) muestran la existencia de diferencias significativas ($P \geq 0,95$)

ANDEVA para la conductividad eléctrica del producto final (día 114)

FV	S.C	g.l.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	0,2460	5	0,0492	7,78	3,11
Error	0,0759	12	0,0063		
Total	0,3219	17			

Tabla 12 Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en aireación forzada

Día	M.O. (g/kg)	C.O.T. (g/kg)	N.T. (g/kg)	Relación C/N
1	945,5	525,3	16,97	30,95
7	884,7	491,5	17,15	28,66
14	787,0	437,2	17,26	25,33
28	660,8	367,1	17,32	21,20
42	564,7	313,7	17,52	17,91
57	461,0	256,1	17,53	14,61
64	395,1	219,5	17,54	12,51
71	389,0	216,1	17,57	12,30
78	388,4	215,8	17,57	12,28
85	388,6	215,9	17,55	12,30
92	388,4	215,8	17,55	12,30
99	388,4	215,8	17,54	12,30
114	388,1	215,6	17,52 ^(*)	12,31

Tabla 13 Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en testigo

Día	M.O. (g/kg)	C.O.T. (g/kg)	N.T. (g/kg)	Relación C/N
1	944,3	524,6	17,21	30,48
7	907,0	503,9	17,13	29,42
14	831,1	461,7	17,12	26,97
28	714,4	396,9	17,20	23,08
42	630,9	350,5	17,12	20,47
57	539,3	299,6	16,93	17,70
64	499,1	277,3	16,34	16,97
71	436,3	242,4	16,23	14,94
78	413,5	229,7	16,20	14,18
85	402,8	223,8	16,21	13,81
92	391,5	217,5	16,24	13,39
99	384,7	213,7	16,25	13,15
114	383,8	213,2	16,24 ^(*)	13,13

Valores con ^(*) muestran la existencia de diferencias significativas ($P \geq 0,95$)

Tabla 14 Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 3 g de inóculo/m³

Día	M.O. (g/kg)	C.O.T. (g/kg)	N.T. (g/kg)	Relación C/N
1	949,5	527,5	16,91	31,19
7	910,1	505,6	16,97	29,79
14	817,4	454,1	17,11	26,54
28	713,9	396,6	17,17	23,10
42	620,8	344,9	17,26	19,98
57	526,9	292,7	17,35	16,87
64	486,9	270,5	17,10	15,82
71	419,2	232,9	17,06	13,65
78	394,2	219,0	17,08	12,82
85	387,6	215,3	17,06	12,62
92	385,1	213,9	16,97	12,60
99	385,2	214,0	16,93	12,64
114	384,7	213,7	16,92	12,63

Tabla 15 Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 6 g de inóculo/m³

Día	M.O. (g/kg)	C.O.T. (g/kg)	N.T. (g/kg)	Relación C/N
1	948,6	527,0	16,92	31,15
7	898,9	499,4	16,97	29,43
14	824,8	458,2	16,92	27,08
28	709,9	394,4	16,94	23,28
42	623,5	346,4	16,88	20,52
57	511,4	284,1	16,81	16,90
64	456,1	253,4	16,77	15,11
71	400,7	222,6	16,79	13,26
78	384,3	213,5	16,93	12,61
85	384,5	213,6	16,89	12,65
92	384,3	213,5	16,89	12,64
99	384,7	213,7	16,97	12,59
114	384,3	213,5	16,96	12,59

Tabla 16 Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 9 g de inóculo/m³

Día	M.O. (g/kg)	C.O.T. (g/kg)	N.T. (g/kg)	Relación C/N
1	942,7	523,7	17,19	30,47
7	904,1	502,3	17,21	29,19
14	828,4	460,2	17,26	26,66
28	717,7	398,7	17,37	22,95
42	632,5	351,4	17,41	20,18
57	506,9	281,6	17,31	16,27
64	448,0	248,9	17,30	14,39
71	398,0	221,1	17,25	12,82
78	385,7	214,3	17,16	12,49
85	385,4	214,1	17,16	12,48
92	385,6	214,2	17,17	12,48
99	385,2	214,0	17,15	12,48
114	385,0	213,9	17,12	12,49

Tabla 17 Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en volteo con 12 g de inóculo/m³

Día	M.O. (g/kg)	C.O.T. (g/kg)	N.T. (g/kg)	Relación C/N
1	943,9	524,4	16,91	31,01
7	897,8	498,8	16,99	29,36
14	828,5	460,3	17,09	26,93
28	714,2	396,8	16,99	23,35
42	624,2	346,8	17,01	20,39
57	502,5	279,2	17,08	16,34
64	442,5	245,8	17,06	14,41
71	396,2	220,1	17,06	12,90
78	384,8	213,8	17,07	12,52
85	384,8	213,8	17,06	12,53
92	385,0	213,9	17,05	12,55
99	385,4	214,1	17,08	12,54
114	385,0	213,9	17,05	12,55

ANDEVA para el contenido de materia orgánica del producto final

FV	S.C	g.l.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	0,120	5	0,024	1,86	3,11
Error	0,155	12	0,013		
Total	0,275	17			

ANDEVA para el contenido de nitrógeno total del producto final

FV	S.C	g.l.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	0,1288	5	0,0258	41,08	3,11
Error	0,0075	12	0,00063		
Total	0,1363	17			

Tabla 18 Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio disponibles y capacidad de intercambio catiónico en el compost final.

	N disp. mg.kg ⁻¹	P disp. mg.kg ⁻¹	K disp. mg.kg ⁻¹	C.I.C. meq/100 g
Aireación forzada	110	362	3424	22,80
Testigo	101	367	3386	21,00
Volteo con 3 g inóculo/m ³	97	333	3365	21,10
Volteo con 6 g inóculo/m ³	101	359	3386	21,20
Volteo con 9 g inóculo/m ³	95	362	3333	21,40
Volteo con 12 g inóculo/m ³	105	390	3474	20,90

ANEXO III
CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN EL COMPOST

Tabla 19 Concentración de metales pesados en el compost (en mg/kg)

	Aireación forzada	Testigo	Volteo con 3g inoc/m ³	Volteo con 6g inoc/m ³	Volteo con 9g inoc/m ³	Volteo con 12g inoc/m ³
Li	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Be	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B	13	12	6	2	4	11
Mg	2419	2248	2215	1892	2276	2345
Al	3335	3366	3046	2682	3128	3412
Ca	2306	2340	2262	2232	2418	2325
Sc	3,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,7
Ti	232	237	230	212	224	217
V	11	11	10	9	10	11
Cr	5	ND	ND	ND	ND	1,3
Mn	196	209	197	181	231	224
Co	3,3	3,3	3,0	2,7	3,7	3,3
Ni	4,3	4,0	1,7	ND	4,7	2,0
Cu	36	37	30	30	35	37
Zn	57	53	42	39	49	65
Ga	ND	ND	ND	ND	ND	ND
As	2	2	5	ND	2	2
Se	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Rb	8,7	8,0	7,1	6,6	7,2	7,1
Sr	51,9	51,3	49,1	50,1	50,8	54,5
Y	4,7	4,3	4,2	3,7	4,3	4,8
Zr	4,4	3,9	3,0	2,4	3,3	3,5
Nb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mo	3,8	2,6	3,4	3,1	3,3	3,8
Ru	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Rh	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ag	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Sn	ND	ND	ND	ND	ND	ND

(Continuación) Tabla 19 Concentración de metales pesados en el compost (en mg/kg)

	Aireación forzada	Testigo	Volteo con 3g inoc/m ³	Volteo con 6g inoc/m ³	Volteo con 9g inoc/m ³	Volteo con 12g inoc/m ³
Sb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Te	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cs	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9
Ba	38,2	38,0	34,1	33,3	37,7	40,5
La	5,0	4,8	4,4	3,9	4,6	5,0
Ce	11,1	10,8	9,6	8,8	10,5	11,2
Pr	1,4	1,3	1,2	1,2	1,3	1,4
Nd	6,2	5,7	5,0	4,6	5,6	6,0
Sm	1,3	1,2	1,3	1,0	1,2	1,4
Eu	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Gd	0,9	1,0	0,9	0,8	1,0	1,0
Dy	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,9
Ho	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Er	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tm	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Yb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Lu	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hf	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ta	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Re	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ir	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pt	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Au	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tl	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	17	20	12	12	13	13
Bi	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Th	1,1	1,1	0,9	0,8	1,0	1,0
U	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ANEXO IV
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

Tabla 20 Análisis microbiológico del compost

	Salmonella en 25 g.	Coliformes Totales NMP/g	Coliformes Fecales NMP/g
Aireación Forzada	Ausencia	40	40
Testigo	Ausencia	15	15
Volteo con 3g inóculo/m³	Ausencia	90	21
Volteo con 6g inóculo/m³	Ausencia	130	70
Volteo con 9g inóculo/m³	Ausencia	90	15
Volteo con 12g inóculo/m³	Ausencia	50	20

ANEXO V
ENSAYO DE INVERNADERO

Tabla 21 Porcentaje de germinación de las semillas de lechuga (suelo/compost)

Día	100% suelo	75/25	50/50	25/75	100% compost
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	17	22	19	17	17
4	47	39	36	42	44
5	72	83	81	78	86
6	83	86	83	83	91
7	83	86	89	89	91
8	83	86	89	89	91

Tabla 22 Expansión del área foliar (cm²)

Día	100% suelo	75/25	50/50	25/75	100% compost
1	0	0	0	0	0
10	0,16	0,18	0,17	0,17	0,16
21	0,55	0,99	1,78	3,54	4,47
34	39	114	246	350	476
45	62	198	430	586	629
55	98	263	605	694	701
70	295	476	937	859	796
82	415	513	1011	903	864

Todos los tratamientos presentan diferencias significativas ($P > 0,95$)

ANDEVA para el área foliar de la lechuga a los 82 días de crecimiento.

FV	S.C	g.l.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	3269766	4	817442	468	2,54
Error	96129	55	1748		
Total	3365895	59			

ANEXO VI
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO UTILIZADO EN EL ENSAYO DE
INVERNADERO

Tabla 23 Características del suelo utilizado en el ensayo de invernadero

Tipo de análisis	Unidad	Valor
pH	pH	8,56
Conductividad Eléctrica	dS/m	3,95
Materia Orgánica	g/kg	4,94
Carbono Orgánico	g/kg	2,91
Nitrógeno Total	g/kg	0,23
Nitrógeno disponible	mg.kg ⁻¹	14
Fósforo disponible	mg.kg ⁻¹	2
Potasio disponible	mg.kg ⁻¹	119
Capac. Intercambio Catiónico	meq/100 g	11,30
Humedad	%	2,8
Densidad	Ton/m ³	1,09

APÉNDICE

NORMA DE CALIDAD DE COMPOST

Propuesta consolidada para consulta pública

TÍTULO II CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST

Párrafo I Parámetros sanitarios

Artículo I Reducción de patógenos

Todos los tipos de compost, es decir Clase A, Clase B e Inmaduro, deberán cumplir copulativamente con los siguientes requisitos:

- 1) Tener una densidad de Coliformes fecales menor a 1.000 Número más Probable (NMP) por gramo de compost, base seca;
- 2) Tener una densidad de Salmonella sp. menor a 3 NMP en 4 gramos de compost, base seca;
- 3) Tener un contenido de huevos de helmintos menor a 1 en 4 gramos de compost, base seca.

Como alternativa al requisito número 3 se entenderá el cumplimiento de alguno de los siguientes requisitos:

- 4) Tener una densidad máxima de virus MS-2 menor a 1 Unidad de Formación de Placas (UFP) en 4 gramos de compost, base seca.
- 5) Si se aplica el método de apilamiento estático con aireación forzada, la temperatura del compost deberá mantenerse a 55 °C o más, por tres días.
- 6) Si se aplica el método de compostaje de apilamiento con volteos, la temperatura del compost deberá mantenerse a 55 °C o más, por un período a lo menos de 15 días. Durante dicho período, las pilas deberán ser volteadas un mínimo de cinco veces. Alternativamente, la temperatura del compost de debe mantener por sobre los 70 °C por un período superior a 30 minutos.

Artículo 2 Olores

El compost no debe presentar olores fuertes (compuestos de sulfuro, mercaptanos, gases TRS) a excepción de un aroma característico a bosque.

Artículo 3 Humedad

Para todo tipo de compost producido y comercializado en el país (clase A, B e Inmaduro) el contenido de humedad no debe ser menor que 30% en peso.

Párrafo 2 Parámetros ambientales

Artículo 4 Metales pesados

Todo compost producido en el país (clase A, clase B o inmaduro) deberá cumplir con los requisitos establecidos en la Tabla 4 respecto a la concentración de metales pesados:

Tabla 24 Concentraciones máximas de metales pesados en compost como contenidos totales

Metal Pesado	Concentración máxima en mg/kg de compost (base seca)¹
Arsénico	15
Cadmio	2
Cobre	100
Mercurio	1
Molibdeno	2
Níquel	20
Plomo	100
Zinc	200

Artículo 5 Conductividad Eléctrica

Todo compost producido en el país deberá cumplir con los siguiente requisitos establecidos respecto a la conductividad eléctrica.

Compost clase A: menor o igual a 5 mmho/cm (dS/m)

Compost clase B: 5-12 mmho/cm (ds/m)

En el caso del compost clase B y si el pH está entre 7,8-8,5 la relación de adsorción de sodio (RAS) debe ser inferior a 7.

Párrafo 3 Parámetros agrícolas

Artículo 6 Relación C/N

El compost se clasificará en función de los siguientes rangos de la relación C/N:

Compost clase A: entre 10-25

Compost clase B: entre 10-40

Compost Inmaduro: Máximo 50

Artículo 7 pH

Compost clase A: 7,0-8,0

Compost clase B: 6,5-8,5

Compost Inmaduro: 6,0-8,5

Artículo 8 Madurez

Un compost se considerará maduro si cumple con el siguiente requerimiento:

Después de una incubación de 24 hrs. en condiciones anaeróbicas a una temperatura de 55 °C el pH del producto compost debe ser mayor a 6,5. Esta exigencia no se aplica para compost inmaduro.

Artículo 9 Materia orgánica

El contenido de materia orgánica para todos los tipos de compost (compost clase A, clase B e Inmaduro) debe ser mayor o igual a 25 % en base seca.

Artículo 10 Productividad agrícola

Todo compost debe obtener a lo menos los siguientes resultados en los siguientes ensayos:

- a) Germinación de semillas: Igual o menor a 2 semillas de maleza germinadas/litro de compost
- b) Toxicidad a las plantas: A lo menos debe prosperar el 90 % de las plantas de referencia (plantación sin compost)
- c) Ensayo con daphnia: CL50.

Párrafo 4 Materias extrañas

Artículo 11 Impurezas

Las impurezas que puede contener el compost se definen a continuación:

Plástico, metal, vidrio y/o caucho, mayor a 2 mm:

Compost clase A: menor o igual a 0,5 % por peso en base seca.

Compost clase B: menor o igual a 1,0 % por peso en base seca.

Compost Inmaduro: menor o igual a 1,0 % por peso en base seca.

Piedras mayor a 5 mm:

Compost clase A: menor o igual a 5 % por peso en base seca.

Compost clase B: menor o igual a 5 % por peso en base seca.

Compost Inmaduro: menor o igual a 5 % por peso en base seca.

Vidrio mayor a 16 mm:

Compost clase A: ausente.

Compost clase B: ausente.

Compost Inmaduro: ausente.

TÍTULO III DE LOS PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO Y ANÁLISIS

Artículo 12 Procedimiento de muestreo

Las muestras de compost terminado se tomarán una vez terminado el proceso de maduración del producto.

Para ello, el productor o el propio laboratorio que realizará los análisis deberá tomar una muestra representativa desde los lugares de acopio del producto.

Para productos comercializados a granel, se debe tomar submuestras por cada metro lineal de la pila de compost desde la superficie hasta una profundidad de 10 cm, las submezclas se mezclan, se homogeneizan y de ahí se toma una muestra de 1 kg para su análisis. Luego esta muestra se deberá introducir en una bolsa plástica cerrada.

Para productos embolsados o ensacados, se debe elegir 3 unidades al azar, luego se deben mezclar y homogeneizar para tomar una mezcla de 1 kg.

Finalmente se deben enviar las muestras en no más de 12 horas al laboratorio reconocido por la autoridad competente.