UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

"DETERMINACIÓN DE LA FITOTOXICIDAD DEL COMPOST DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CARHUAZ, UTILIZANDO EL CULTIVO DE TRIGO COMO INDICADOR, CARHUAZ - ANCASH, 2017"

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR:

Bach. **ANTHONY LUISIN PACCINI SÁNCHEZ**

ASESOR:

M. Sc. **ALFREDO REYES NOLASCO**

Huaraz, Ancash, Perú
Mayo, 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

"DETERMINACIÓN DE LA FITOTOXICIDAD DEL COMPOST DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CARHUAZ, UTILIZANDO EL CULTIVO DE TRIGO COMO INDICADOR, CARHUAZ - ANCASH, 2017"

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR:

Bach. **ANTHONY LUISIN PACCINI SÁNCHEZ**

ASESOR:

M. Sc. **ALFREDO REYES NOLASCO**

Huaraz, Ancash, Perú
Mayo, 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO

"Una nueva Universidad para el Desarrollo"

REPOSITORIO INSTITUCIONAL U N A S A M

Dirección del Instituto de Investigación

FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, PARA OPTAR GRADOS ACADÉMICOS Y TÍTULOS PROFESIONALES EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL - UNASAM

Conforme al Reglamento Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI
Resolución de Consejo Directivo de SUNEDU N° 033-2016-SUNEDU/CD

1. Datos del Autor:
   Apellidos y Nombres: PACCINI SANCHEZ ANTHONY LUISIN
   Código de alumno: 091.0605.028 Teléfono: 947890900
   Correo electrónico: anthonypaccini@gmail.com DNI o Extranjería: 70757608

2. Datos del Autor:
   ( ) Trabajo de investigación ( ) Trabajo académico
   ( ) Trabajo de suficiencia profesional (X) Tesis

3. Título profesional o grado académico:
   ( ) Bachiller (X) Título ( ) Segunda especialidad
   ( ) Licenciado ( ) Magister ( ) Doctor

4. Título del trabajo de investigación:
   "DETERMINACIÓN DE LA FITOTOXICIDAD DEL COMPOST DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CARHUAZ, UTILIZANDO EL CULTIVO DE TRIGO COMO INDICADOR, CARHUAZ - ANCASH, 2017"

5. Facultad de: CIENCIAS DEL AMBIENTE
6. Escuela, Carrera o Programa: INGENIERÍA AMBIENTAL
7. Asesor:
   Apellidos y Nombres: ALFREDO REYES NOLASCO Teléfono: 943869269
   Correo electrónico: alrenol@yahoo.es DNI o Extranjería: 08297522

A través de este medio autorizo a la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, publicar el trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA) y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI).
Asimismo, por la presente, dejo constancia que los documentos entregados a la UNASAM, versión impresa y digital, son las versiones finales del trabajo sustentado y aprobado por el jurado y son de autoría del suscrito respecto de la legislación en materia de propiedad intelectual.

Firma: .....
D.N.I.: 70757608

FECHA: Huaraz, 26 de julio de 2019

"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el Auditórium de la FCAM-UNASAM, de conformidad a la normatividad vigente conducen el Acto Académico de Sustentación y Defensa de Tesis **DETERMINACIÓN DE LA FITOTOXICIDAD DEL COMPOST DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CARHUAZ, UTILIZANDO EL CULTIVO DE TRIGO COMO INDICADOR, CARHUAZ-ANCASH, 2017**, que presenta **PACCINI SANCHEZ ANTHONY LUISIN** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

En seguida, después de haber atendido la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, lo declaramos:

APROBADO CON DISTINCIÓN

Con el calificativo de: ....DIECIOCHO..... (18)

En consecuencia, **PACCINI SANCHEZ ANTHONY LUISIN** queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento de su **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario Nº 399-2015-UNASAM), el Art. 48° del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario - Rector Nº 761-2017-UNASAM) y el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario - Rector Nº 232-2017-UNASAM).

Huaraz, 28 de Junio de 2019

Ing. **ARNULFO SERNA ROMÁN**
Presidente
Jurado de sustentación

Ing. **FRANCISCO CLAUDIO LEÓN HUERTA**
Secretario
Jurado de sustentación

MSc. **ELVIS JESÚS ESPÍRITU ESPÍRITU**
Vocal
Jurado de sustentación

Dr. **ALFREDO WALTER REYES NOLASCO**
Asesor de tesista

DEDICATORIA

A la creación y a la vida en su diversidad.

A mis padres, por su apoyo constante y por
enseñarme que siempre se puede hacer lo correcto.

A mi hermano, por ser el mejor
ejemplo de esfuerzo, sacrificio y entrega.

Anthony Paccini Sánchez.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano, por su constante preocupación y por su ayuda, haciendo posible la conclusión de esta etapa.

Al M. Sc. Alfredo Reyes Nolasco, por su asesoría en la formulación y desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Juan Barreto Rodríguez, por su constante orientación en la ejecución de la tesis.

A la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo y a la Facultad de Ciencias del Ambiente, en donde me formé y concreté mi amor y compromiso por el cuidado y la preservación ambiental. A mis amigos y hermanos en la profesión, por el trabajo en común durante nuestra formación universitaria y por el aliento durante el desarrollo de la investigación.

Al laboratorio de la Facultad de Ciencias del Ambiente, por brindarme las facilidades para el desarrollo de los diversos ensayos y pruebas experimentales.

A los compañeros y amigos con quienes comparto la pasión por el estudio del Compostaje, al CEMTRAR – UNALM, por su apoyo y enseñanzas impartidas.

RESUMEN

La creciente producción de residuos sólidos en todos los niveles ha vuelto urgente la necesidad de valorizarlos para la obtención de nuevos productos, siendo este el caso del compost para con los residuos orgánicos. El compost posee características variables, debido a su muy diversa composición y, en ciertos casos, el inadecuado manejo del proceso mediante el cual se obtiene y la alta concentración de sustancias con potencial fitotóxico, compromete su calidad y disminuye las posibilidades de uso.

El objetivo de esta investigación fue determinar el grado de fitotoxicidad del compost producido por la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz, Ancash. Se colectaron dos unidades muestrales. La primera de compost existente, de la cual no se conoce su antigüedad y, por lo mismo, sus características podrían haber variado en el tiempo. La segunda unidad muestral fue de compost fresco. Ambas unidades muestrales fueron sometidas a análisis de laboratorio y ensayos biológicos (germinación, siembra directa y cultivo de plantas) empleándose trigo (*Triticum spp*) como indicador de toxicidad.

Los resultados obtenidos mostraron altos valores de conductividad (8.44 y 9.58 dS/m), metales pesados (Pb: 64.5 ppm y 50.44 ppm, Cd: 2.13 ppm y 3.34 ppm, Cr: 24.13 ppm y 22.54 ppm) e impurezas (53.87% y 48.56%) presentes en el compost existente y compost fresco respectivamente, superando los límites establecidos por las normas de calidad empleadas. Los valores para pH, relación C/N, MO, nutrientes y sustancias húmicas se mostraron normales. Los valores microbiológicos estuvieron por debajo del límite permitido.

Los resultados de la prueba de germinación indicaron que las unidades muestrales, según el test de Zucconi, son moderadamente fitotóxicas (IG: 55.4% para el compost existente y 64.9% para el compost fresco). La prueba de siembra directa mostró que, para tratamientos con composiciones volumétricas de compost al 15% se genera, en términos de biomasa fresca, 117% para el compost existente y 105% para el compost fresco. Con compost al 30% la generación de biomasa desciende a 56.6% para el compost existente y 95.7% para compost fresco. Con compost al 45% los valores de biomasa son de 14.9% para el compost existente y 75% para el compost fresco. Al no cumplirse lo establecido por la ÖNORM S2023, denota un efecto tóxico en la germinación y desarrollo vegetal. La prueba de cultivo en macetas presentó los mejores resultados de rendimiento de masa fresca en todos los tratamientos con compost fresco (171%, 159% y 146%), difiriendo con los resultados obtenidos con compost existente que, al 25% logró un rendimiento del 78%

de masa fresca, el mismo que disminuyó con proporciones de compost al 50 y 75%, incumpliendo los criterios establecidos en el libro de métodos para el análisis del compost de la FCQAO. Además, se evidenciaron sintomatologías en las hojas, atribuibles a la toxicidad por sales y metales pesados, presentes en concentraciones elevadas.

Se evidencia que, en su conjunto, el compost producido a base de la fracción orgánica de los RSU de Carhuaz, siguiendo la técnica de compostaje manual empleada por la planta de tratamiento es moderadamente fitotóxico. Finalmente, este compost puede ser valorado, en función de su calidad, como mejorador del suelo.

Palabras clave: *Residuos sólidos, compostaje, compost, calidad, fitotoxicidad, ensayos biológicos.*

ABSTRACT

The growing production of solid waste at all levels has made it urgent to value them for obtaining new products, this being the case of compost for organic waste. The compost has variable characteristics, due to its very diverse composition and, in certain cases, the inadequate handling of the process by which it is obtained and the high concentration of substances with phytotoxic potential, compromises its quality and diminishes the possibilities of use.

The objective of this investigation was to determine the degree of phytotoxicity of the compost produced by the municipal solid waste treatment plant of Carhuaz, Ancash. Two sample units were collected. The first of existing compost, whose age is not known and, therefore, its characteristics could have varied over time. The second sample unit was fresh compost. Both sample units were subjected to laboratory tests and biological tests (germination, direct sowing and plant cultivation) using wheat (*Triticum spp*) as an indicator of toxicity.

The results obtained showed high values of conductivity (8.44 and 9.58 dS/m), heavy metals (Pb: 64.5 ppm and 50.44 ppm, Cd: 2.13 ppm and 3.34 ppm, Cr: 24.13 ppm and 22.54 ppm) and impurities (53.87% and 48.56%) present in the existing compost and fresh compost respectively, exceeding the limits established by the quality standards used. Values for pH, C/N ratio, MO, nutrients and humic substances were normal. The microbiological values were below the allowed limit.

The results of the germination test indicated that the sampling units, according to the Zucconi test, are moderately phytotoxic (GI: 55.4% for the existing compost and 64.9% for the fresh compost). The direct seeding test showed that, for treatments with 15% compost volumetric compositions, in terms of fresh biomass, 117% is generated for the existing compost and 105% for the fresh compost. With 30% compost biomass generation decreases to 56.6% for the existing compost and 95.7% for fresh compost. With compost at 45% the biomass values are 14.9% for the existing compost and 75% for the fresh compost. By not complying with the provisions of ÖNORM S2023, it denotes a toxic effect on germination and plant development. The pot culture test showed the best results of fresh mass yield in all the treatments with fresh compost (171%, 159% and 146%), differing with the results obtained with existing compost, which, at 25% achieved a yield of 78% of fresh dough, the same that decreased with proportions of 50% and 75% compost, not complying with the criteria established in the book of methods for the analysis

of the compost of the FCQAO. In addition, symptomatology was evidenced in the leaves, attributable to the toxicity of salts and heavy metals, present in high concentrations.

It is evident that, as a whole, the compost produced based on the organic fraction of the Carhuaz MSW, following the manual composting technique employed by the treatment plant, is moderately phytotoxic. Finally, this compost can be valued, depending on its quality, as a soil improver.

Key words: *Solid waste, composting, compost, quality, phytotoxicity, biological tests.*

INDICE

CONTENIDO	Pág.
AUTORIZACIÓN	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
INDICE	ix
LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvi
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	**1**
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Formulación del problema	6
1.3. Hipótesis	8
1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo general	9
1.4.2. Objetivos específicos	9
CAPÍTULO II	
MARCO REFERENCIAL	**10**
2.1. Antecedentes	10
2.2. Marco teórico	15
2.2.1. Residuos sólidos	15
2.2.1.1. Residuos sólidos de ámbito de gestión municipal	15
2.2.1.2. Residuos sólidos orgánicos	16
2.2.2. Abonos orgánicos	17
2.2.3. Compostaje	18
2.2.3.1. Compost	24
2.2.3.2. Tipos de compost	24
2.2.3.3. Proceso de elaboración del compost	25
a. Factores que determinan el proceso de compostaje	25

b. Parámetros esenciales para un óptimo proceso de compostaje 29
- Parámetros de seguimiento 29
  - ✓ Temperatura 29
  - ✓ Humedad 31
  - ✓ pH 32
  - ✓ Aireación 34
- Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato 35
  - ✓ Relación C/N 35
  - ✓ Nutrientes 35
  - ✓ Materia orgánica 36
  - ✓ Conductividad eléctrica (CE) 37

c. Manejo del proceso de compostaje 38
- Volteos 38
- Humedecimiento o riego 39
- Encalado 39
- Manejo de lixiviados 39
- Manejo de impurezas 40

2.2.3.4. Calidad del compost 41

a. Estabilidad y madurez del compost 42
b. Fitotoxicidad como indicador de madurez 44
c. Ensayos biológicos 46
- Germinación y elongación de raíces 46
- Siembra directa 48
- Cultivo de plantas 49

d. Evaluación de la calidad del compost 50
e. Normas sobre compostaje y calidad del compost 53

2.2.3.5. Aplicaciones del compost 55

a. Como sustrato o soporte de cultivos 55
b. Como enmienda orgánica 55
c. Como abono orgánico 56
d. Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades del suelo 57
e. Aplicaciones en agricultura 59
f. Aplicaciones alternativas 61

2.2.4. El trigo como indicador 63

2.3. Definición de términos 64

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA 66

3.1. Diseño y caracterización de la muestra 66

3.1.1. Características generales del proceso de compostaje en la Planta de tratamiento de residuos sólidos municipales 66

3.1.1.1. Ubicación 66

3.1.1.2. Descripción de la planta 67

3.1.2. Población 67

3.2. Técnicas e instrumentos de acopio de información 67

3.2.1. Colecta de muestras 67

3.2.2. Control del proceso de compostaje 68

3.2.2.1. Control de la temperatura 69

3.2.2.2. Control de la humedad 69

3.2.2.3. Control del pH 70

3.2.2.4. Parámetros sensoriales de madurez 71

3.2.3. Procedimiento para la colecta de sub-muestras de compost 72

3.2.4. Procedimiento para la caracterización del compost 73

3.2.5. Procedimiento para la determinación del efecto tóxico germinativo del compost 74

3.2.6. Procedimiento para determinar el efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa 74

3.2.6.1. Ensayo de siembra directa 74

3.2.6.2. Test de cultivo de plantas 75

3.3. Técnicas de procesamiento y análisis de datos 77

3.3.1. Análisis del control del proceso de compostaje 77

3.3.2. Caracterización del compost 78

3.3.3. Efecto tóxico germinativo del compost 78

3.3.4. Efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa 78

3.3.4.1. Siembra directa 78

3.3.4.2. Test de cultivo de plantas 79

3.4. Diagrama general del trabajo 80

CAPÍTULO IV

RESULTADOS 81

4.1. Descripción del funcionamiento y estado actual de la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz 81

4.2. Control del proceso de compostaje 88
4.2.1. Variación de la temperatura 88
4.2.2. Variación de la humedad 90
4.2.3. Variación del pH 91
4.2.4. Parámetros sensoriales de madurez 91
4.3. Caracterización del compost 92
4.3.1. Características físicas del compost bajo análisis 93
4.3.2. Características químicas del compost bajo análisis 94
4.3.3. Características microbiológicas del compost bajo análisis 98
4.4. Efecto tóxico germinativo del compost 99
4.4.1. Índice de germinación 99
4.5. Efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa 100
4.5.1. Siembra directa 100
4.5.2. Test de cultivo de plantas 103

CAPÍTULO V
DISCUSIÓN DE RESULTADOS **107**
5.1. Control del proceso de compostaje 107
5.2. Caracterización del compost 110
5.3. Efecto tóxico germinativo del compost 117
5.3.1. Índice de germinación 117
5.4. Efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa 118
5.4.1. Siembra directa 118
5.4.2. Test de cultivo de plantas 119
5.5. Calidad agronómica del compost 120

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **123**
Conclusiones 123
Recomendaciones 125

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **126**

ANEXOS **142**

LISTA DE TABLAS

CONTENIDO **Pág.**

Tabla 01: Tipos de abonos orgánicos. 17
Tabla 02: Resumen de los efectos de los abonos orgánicos sobre las características del suelo. 18
Tabla 03: Tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos urbanos biodegradables. 23
Tabla 04: Ventajas e inconvenientes de las tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos urbanos biodegradables. 24
Tabla 05: Principales sistemas de compostaje. 28
Tabla 06: Parámetros esenciales para un óptimo proceso de compostaje. 29
Tabla 07: Microorganismos: características e intervalos de temperatura óptima. 31
Tabla 08: Rangos de humedad y sus características. 33
Tabla 09: Procesos microbianos en función del rango de pH. 34
Tabla 10: Nutrientes y su importancia en el desarrollo microbiano. 36
Tabla 11: Aspectos que afectan la calidad del compost. 51
Tabla 12: Parámetros para evaluar la calidad de un compost dependiendo del uso. 51
Tabla 13: Determinaciones que pueden ser utilizadas para valorar la calidad del compost. 52
Tabla 14: Efectos de la aplicación de compost sobre las propiedades del suelo. 57
Tabla 15: Usos del compost en la agricultura. 59
Tabla 16: Efectos de la aplicación de diferentes tipos de fertilizantes sobre el desarrollo vegetal. 60
Tabla 17: Ubicación de la planta de tratamiento de residuos sólidos de la MPC. 66
Tabla 18: Evaluaciones realizadas con cada unidad muestral. 68
Tabla 19: Proporciones de suelo - compost para la conformación de los tratamientos. 76
Tabla 20: Rangos óptimos de temperatura, humedad y pH durante el proceso de compostaje. 77
Tabla 21: Programación regular de la recolección de residuos sólidos en el distrito de Carhuaz. 82

Tabla 22: Características físicas de las unidades muestrales de compost analizadas y su comparación con la norma. 93
Tabla 23: Caracterización química de las unidades muestrales de compost y su comparación con la norma. 94
Tabla 24: Contenido de materia orgánica en las muestras de compost y su comparación con la norma. 95
Tabla 25: Valores de Conductividad eléctrica reportados para las unidades muestrales de compost y su comparación con la norma. 95
Tabla 26: Valores de nutrientes reportados para las unidades muestrales de compost. 96
Tabla 27: Contenido de metales pesados en las unidades muestrales y límites propuestos en diferentes normas. 97
Tabla 28: Sustancias húmicas presentes en las unidades muestrales de compost. 97
Tabla 29: Análisis microbiológico de la unidad muestral Compost Fresco. 98
Tabla 30: Población microbiana presente en el compost bajo análisis. 98
Tabla 31: Dimensiones de las pilas de compostaje monitoreadas. 108

LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO **Pág.**

Figura 01: Sucesión microbiana y evolución de la temperatura, relación C/N y pH durante el compostaje. 21
Figura 02: Representación esquemática de las principales operaciones y/o etapas del proceso de compostaje. 26
Figura 03: Variación de la temperatura en una ruma de compost. 31
Figura 04: Representación esquemática del balance de materia en el compostaje. 37
Figura 05: Esquema de muestreo. 67
Figura 06: Disposición de pilas de compostaje para su monitoreo 69
Figura 07: Esquema de puntos de control de temperatura en la pila de compostaje (Izquierda). Termómetro digital registrando valores de temperatura en la pila de compostaje (Derecha). 70
Figura 08: Medición del pH en la pila de compostaje. 70
Figura 09: Impurezas halladas durante los ensayos biológicos. 72

Figura 10: Secuencia para la colecta de sub-muestras de compost. 73
Figura 11: Variables y parámetros analizados para valorar la calidad del compost. 73
Figura 12: Test de Zucconi aplicado en semillas de trigo con tratamientos de compost antiguo (etiqueta amarilla) y compost fresco (etiqueta verde). 74
Figura 13: Siembra de semillas y distribución de los tratamientos al azar. 75
Figura 14: Esquema del ensayo de cultivo de plantas o Test modificado de barley. 76
Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología. 80
Figura 16: Distribución de la planta de tratamiento de residuos sólidos. 82
Figura 17: Distribución de las pilas durante el compostaje. 83
Figura 18: Segregación de residuos. 83
Figura 19: Volteo manual de pilas de compostaje. 84
Figura 20: Pilas de compost en la etapa de maduración. 85
Figura 21: Estancamiento de lixiviados alrededor de las pilas. 85
Figura 22: Tamizado del producto final. 86
Figura 23: Variación de la temperatura de las pilas de compostaje durante su monitoreo. 89
Figura 24: Variación de la humedad de las pilas de compostaje durante su monitoreo. 90
Figura 25: Variación del pH de las pilas de compostaje durante su monitoreo. 91
Figura 26: Porcentaje de germinación relativa (PGR), crecimiento radicular relativo (CRR) e índice de germinación (IG) de semillas de Triticum spp. obtenidos con los extractos de compost. 99
Figura 27: Variación del retraso germinativo de semillas de Triticum spp. registrados para los distintos tratamientos con compost. 102
Figura 28: Variación porcentual de la biomasa generada por semillas de Triticum spp. registrada para los distintos tratamientos con compost. 102
Figura 29: Evaluación de la germinación de semillas en el ensayo de cultivo de plantas. 104
Figura 30: Evaluación del número de plantas al término del ensayo de cultivo de plantas. 105

Figura 31: Evaluación del rendimiento de la masa fresca registrado para los distintos tratamientos con compost. 105
Figura 32: Evaluación de la altura media alcanzada por las plantas al término del ensayo de cultivo de plantas 106
Figura 33: Sintomatología presentada por las plantas durante el ensayo. (A) Tratamiento control, (B) tratamiento con compost fresco al 50%, (C) tratamiento con compost existente al 50%. 106

LISTA DE ABREVIATURAS

CH_4	Metano.
CO_2	Dióxido de Carbono.
COP	Compuestos Orgánicos Persistentes.
CFC	Clorofluorocarbonos.
C	Carbono.
N	Nitrógeno.
P	Fósforo.
K	Potasio.
t	Tonelada.
ha	Hectárea.
hm	Hectómetros.
pH	Potencial de hidrógeno.
CIC	Capacidad de intercambio catiónico.
MJ	Megajoules.
NOx	Óxidos de nitrógeno.
C/N	Relación carbono nitrógeno.
CE	Conductividad eléctrica.
FAS	Free Air Space (Espacios de aire libre).
°C	Grados centígrados.
dS.m-1	deciSiemens por metro.
ml	Millitros.
mm	Milímetros.
PGR	Porcentaje de germinación relativa.
CRR	Crecimiento radicular relativo.
IG	Índice de germinación.
SA	Área superficial.

V	Volumen.
cc	Centímetros cúbicos.
RSU	Residuos sólidos urbanos.
P_2O_5	Óxido de fósforo.
K_2O	Óxido de potasio.
ppm	Partes por millón.
PVC	Policloruro de vinilo.
NMP	Número más probable.
UFC	Unidades formadoras de colonias.
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El incremento de la generación de residuos sólidos, la ineficiencia en los servicios de limpieza pública, la escasa valorización y la inadecuada disposición final de los mismos se ha convertido en un serio problema de gestión y manejo para nuestro país. Mal manejados, los residuos sólidos se han convertido en una de las fuentes más importantes de emisión de gases de efecto invernadero (Binner at al., 2016), además de los graves impactos que conlleva el disponer de los mismos en el ambiente (OEFA, 2016).

En este contexto, con la actualización y aprobación del Decreto Legislativo N° 1278, la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y su respectivo reglamento, se tiene como principio, entre otros, la valorización de residuos. Plantea, además, lineamientos que buscan fomentar la adopción complementaria de prácticas de tratamiento y procurar que la gestión de residuos sólidos contribuya a la lucha contra el cambio climático. Precisamente, el tratamiento de los residuos sólidos incluye procesos, métodos y técnicas que permiten modificar sus características físicas, químicas o biológicas, eliminando así su potencial peligro para la salud y el ambiente. El compostaje es una operación de valorización a través de la cual la materia orgánica se descompone, en condiciones controladas de temperatura, humedad y oxigenación, para dar paso a un producto estable, maduro e inocuo llamado compost (Bueno et al., 2008; Solivá et al., 2007). Es importante considerar que existe una relación entre el control del compostaje de residuos orgánicos como proceso y la calidad del producto obtenido (Chica & García, 2008). Se debe considerar también que, tanto el origen como la composición de estos residuos orgánicos es muy diverso, por lo cual se deben valorar los cambios, ventajas y efectos (positivos y/o negativos) que puede aportar el compost durante su utilización (Ingelmo et al., 2008).

Entonces, la utilización del compost está sujeta a su calidad, lo que dependerá, en gran medida, de características que lo conviertan en un material agronómicamente útil (Masaguer & Benito, 2008). De no ser el caso, puede ocasionar inconvenientes para el desarrollo de las plantas, esto es, inhibición de la germinación, toxicidad, daños estructurales y pérdidas en términos de productividad, sin considerar los daños asociados al suelo (Iglesias et al., 2008). Las causas son diversas: alto contenido en sales solubles, biodisponibilidad de metales pesados potencialmente fitotóxicos provenientes de los residuos de entrada, generación de amoníaco y ácidos orgánicos producto de compost inmaduros luego de procesos mal controlados, etc. (Bueno et al., 2008; Ytavclerh, 2017; Zubillaga et al., 2008).

En el Perú se emplea el compostaje para tratar la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y los residuos provenientes de la actividad agrícola, tanto en el sector público como en el privado. De hecho, la ciudad de Carhuaz, ubicada en el departamento de Ancash, adoptó el compostaje como método de tratamiento desde el año 2004 aproximadamente y, es de las pocas en la región que viene gestionando sus residuos orgánicos obteniendo de ellos compost.

Recientemente, y por propuesta de los estamentos gubernamentales, se viene promoviendo la adopción de esta operación para la valorización de los residuos orgánicos, que representan el 56% del total de residuos sólidos generados a nivel nacional (MINAM, 2018), pero aún no se establecen criterios para verificar si el compost tiene la calidad aceptable para sus diversas aplicaciones. En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue determinar el grado de fitotoxicidad del compost producido por la Planta de tratamiento de Residuos Sólidos municipales de Carhuaz, empleando trigo (*Triticum spp*) como indicador, a fin de verificar lo establecido por los lineamientos de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, que es garantizar la no existencia de peligros potenciales para la salud y el ambiente al emplear estos métodos de tratamiento.

La tesis está organizada en seis capítulos. En el primero se menciona el planteamiento y formulación del problema ambiental, la hipótesis y los objetivos a alcanzar. El segundo constituye el marco de referencia para la investigación. El tercero describe la metodología empleada, definiéndose además el diseño y caracterización de la muestra, la ubicación del sitio en evaluación y las técnicas empleadas para el acopio de información y el procesamiento de datos. El cuarto capítulo contiene los resultados obtenidos, el quinto la discusión de los mismos, finalizando con las conclusiones de la investigación y las recomendaciones pertinentes en el sexto capítulo.

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, la oferta de los bienes se ha incrementado significativamente durante los últimos años, debido a las variaciones en los hábitos de consumo de las personas. Por otro lado, los bienes que se producían para durar mucho tiempo, hoy tienen vidas útiles más cortas, por lo que se genera una gran cantidad de residuos. La gestión y manejo de los residuos sólidos no ha cambiado de la misma manera. Ello ha generado, en muchos casos, la ruptura del equilibrio entre el ecosistema y las actividades humanas (OEFA, 2016a).

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) estima que en el mundo se producen de 7000 a 10 000 millones de toneladas de residuos urbanos cada año y casi 3000 millones de personas no tienen acceso a instalaciones controladas para la eliminación de sus residuos; reporta The International Solid Waste Association (ISWA) en el Global Waste Management Outlook.

En el Perú se tiene una generación de 7 497 482 toneladas de residuos urbanos municipales al año, de los cuales un 64% son residuos sólidos domiciliarios y un 26% son residuos no domiciliarios. Respecto a la composición de los residuos sólidos el 56% son residuos orgánicos, el 18% pertenece a residuos reciclables inorgánicos, el 19% son residuos no reaprovechables, y, finalmente, el 7% está compuesto por residuos peligrosos. En cuanto a su disposición final, un 48% son llevados a botaderos u otros destinos no autorizados, poniendo en riesgo la calidad ambiental y la salud de las personas; según información provista por los gobiernos locales mediante la plataforma SIGERSOL y Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos (MINAM, 2018).

Tal como se ha mostrado, las distintas actividades humanas generan una gran cantidad de residuos de diversos orígenes, cuya acumulación incontrolada puede generar una serie de impactos en el ambiente. Es el caso de la contaminación de cuerpos hídricos, cuando se arrojan residuos sobre estos o por lixiviados generados por la descomposición de residuos orgánicos que alcanzan las aguas subterráneas (HONDUPALMA, 2011). La contaminación del suelo se produce por la descarga directa de residuos sólidos en lugares de disposición no autorizados, generando impactos incluso hasta en el paisaje. La calidad del aire se ve comprometida por la emisión de gases generados por la descomposición de los residuos o la eventual quema de estos.

Es así que tenemos la presencia de gases de efecto invernadero (producto de la quema de residuos generando metano- CH_4 y dióxido de carbono- CO_2) que retienen el calor y elevan la temperatura de la atmósfera; compuestos orgánicos persistentes (COP), dada la combustión de residuos, pueden formarse dioxinas y furanos, compuestos de alto riesgo ambiental y para la salud humana, tanto por su toxicidad como por su largo tiempo de persistencia en el ambiente; degradadores de la capa de ozono, provenientes de productos tales como aerosoles, pinturas y desodorantes en cuya elaboración se usan agentes químicos que generan clorofluorocarbonos- CFC (OEFA, 2016).

En el Decreto legislativo N° 1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos se señala que, para que los residuos sólidos no produzcan estos impactos negativos, deben someterse a procesos, métodos o técnicas que permitan modificar las características físicas, químicas o biológicas, a fin de reducir o eliminar su potencial peligro de causar daños a la salud o al ambiente, todo ello orientado a valorizar o facilitar su disposición final.

Se puntualiza entonces en los métodos conjuntos de separación, recolección y aprovechamiento de los residuos sólidos para entender que, optando por la valorización de estos, gran parte de los residuos generados por una población determinada habrán sido aprovechados, reduciendo los posibles impactos que pudieran haber generado, evitando así su disposición final.

De esta manera, los residuos sólidos, según su tipo, podrán reaprovecharse por medio de un mecanismo de segregación en la fuente, que consiste en agrupar determinados tipos de residuos con características físicas similares para, posteriormente, recibir un manejo adecuado; de un sistema de recolección selectiva y de algún método para su tratamiento (MINAM, 2018).

El reaprovechamiento de los residuos sólidos dependerá de su tipo. Los residuos inorgánicos pueden ser transformados a través del reciclaje para luego cumplir su fin inicial u otros fines. Sin embargo, los residuos orgánicos son una valiosa fuente de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y otros macro y micronutrientes. Por ello su utilización en la agricultura es un destino eficiente (Fortun, Diaz-Burgos, Fortun, & Polo, 1995).

Precisamente, el uso de abonos orgánicos para mantener y mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y obtener mayores rendimientos en el cultivo de las cosechas, se conoce desde la antigüedad (Santos, 2015).

El mismo autor señala que, entre los abonos orgánicos se incluyen los estiércoles, desechos vegetales, abonos verdes y efluentes como abonos sin procesar; y el compost, bocashi, lombricompost como abonos procesados sólidos. Señala además que, los abonos orgánicos son muy variables en sus características físicas y composición química, principalmente en el contenido de nutrientes; la aplicación constante de ellos, con el tiempo, mejora las características físicas, químicas, biológicas y sanitarias del suelo.

Hoy en día, las prácticas de manejo, en una agricultura sustentable, promueven la recirculación de nutrientes a través del compostaje de residuos orgánicos, minimizando los impactos en el ambiente (Contardi & De Errasti, 2012).

Así pues, el compostaje, según Iglesias (2003) es la descomposición biológica aeróbica de la materia orgánica en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, seguida por una estabilización y maduración del producto.

Haug et al. (1993) describe el compost como materia orgánica que ha sido estabilizada hasta transformarse en un producto parecido a las sustancias húmicas del suelo, que está libre de patógenos y de semillas de malas hierbas, que no atrae insectos o vectores, que puede ser manejada y almacenada sin ocasionar molestias y que es beneficiosa para el suelo y el crecimiento de las plantas.

El uso que se le vaya a dar al compost limita la gama de residuos orgánicos a los que se deba aplicar el compostaje y condiciona las operaciones de producción. Un residuo/subproducto, para ser compostado, debe cumplir unos requisitos tanto para posibilitar el proceso como para generar un producto con una determinada calidad (Soliva & López, 2004). Los mismos autores señalan que, dentro de los niveles de calidad, pueden establecerse distintas exigencias, según el destino del producto, protección del entorno y los requerimientos del mercado. Por consiguiente, la estrategia para conseguir una determinada calidad no puede separarse de un planteamiento global de la gestión de residuos.

Para potenciar la puesta en práctica del compostaje, las plantas de valorización deben tener como objetivo principal la obtención del compost y no sólo el tratamiento de residuos. Sin embargo, no se composta para obtener un determinado producto, sino que se gestionan y/o tratan uno o varios residuos orgánicos con la intensión de evitar problemas ambientales y, secundariamente,

obtener un producto; aparte de que el proceso se lleva a cabo, muchas veces ignorando sus fundamentos biológicos y obviando la relación entre control del proceso y la calidad del producto obtenido.

Países como China, Austria, Australia, España, México, Colombia, Argentina, Chile, Costa Rica, entre otros; están tomando muy en serio la necesidad de aprovechar los residuos orgánicos que sus poblaciones producen, optando por la producción de compost con niveles de exigencia reglamentados en normas que buscan que la calidad de este genere beneficios agronómicos, a la vez que pretenden proteger al suelo de una aplicación excesiva de nutrientes, o que simplemente busquen evitar la contaminación excesiva por metales. A la fecha, el Perú carece de normas que busquen que el proceso productivo del compost sea adecuado y que, sobre todo, el producto sea de calidad y aplicabilidad.

1.2. Formulación del problema

El origen, disponibilidad y composición de los residuos orgánicos es variado, depende del área geográfica en la que se generen y de su actividad económica (Dupuis, 2008; Felipó & Soliva, 2003; López-Cepero, 2010). La correcta gestión de los mismos es fundamental, por ejemplo, en la producción agrícola, por su relación con la mejora de la fertilidad de los suelos (Garrabou & Naredo, 1996), el reciclado de nutrientes y la conservación del entorno, evitando la contaminación de suelos, aguas y cultivos por exceso de nutrientes, microorganismos patógenos, metales pesados o contaminantes orgánicos (Soliva, 2011). De hecho, este tipo de residuos pueden ser sometidos al compostaje como tratamiento biológico, con el objetivo de disminuir su peso, su volumen y la fermentabilidad. Además, los higieniza y transforma en un recurso con ventajas ambientales, económicas y sociales (Soliva, 2011).

Para que el uso del compost sea una alternativa viable, debe tener una calidad agronómica adecuada en el tiempo (Garcia, Lima, Ruiz, & Calderon, 2014); esto es, aspecto y olor aceptables, correcta higienización, bajo nivel de impurezas y contaminantes, un buen nivel de componentes agronómicamente útiles y una cierta constancia de características (Soliva & López, 2004).

En este entendido, no debe suponerse que el compostaje es bueno, ya que mal planteado e insuficientemente controlado puede crear problemas importantes; tampoco debe considerarse que todos los compost presentan las mismas características y que generan los mismos efectos al ser aplicados (Soliva, 2011).

Si el compost no cumple con unos criterios de calidad, su aplicación puede ocasionar diversos inconvenientes (López & Sainz, 2011), tales como inhibición del crecimiento vegetal, contenido alto en sales solubles e incremento en el grado de biodisponibilidad de metales pesados potencialmente tóxicos (Garcia et al., 2014; Iglesias, 2003). La producción de compuestos fitotóxicos durante la descomposición de un compost inmaduro en el suelo es otra de las causas de los graves efectos observados en la fisiología de las plantas y en la germinación de las semillas. El efecto fitotóxico en las semillas y plantas está ocasionado fundamentalmente por la emisión de amoníaco, óxido de etileno y ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Masaguer & Benito, 2008).

En el Perú, las prácticas de compostaje vienen siendo aplicadas en distintos ámbitos, siendo uno de ellos el de la gestión municipal de residuos sólidos. Con la aprobación del Decreto Legislativo N° 1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, se inserta la valorización de residuos sólidos como alternativa de gestión y manejo (que debe priorizarse frente a la disposición final) y que incluye las actividades de reutilización, reciclaje, compostaje, valorización (material y/o energética), entre otros.

La valorización (material, en este caso) se sustenta en el sistema de recolección selectiva de residuos y que luego, a través de procesos de transformación (física, química u otros) demuestren la viabilidad técnica, económica y ambiental del producto. La ley señala que las municipalidades deben valorizar los residuos generados en su jurisdicción, priorizando los residuos orgánicos provenientes del mantenimiento de áreas verdes y mercados municipales, así como, de ser factible, los residuos orgánicos de origen domiciliario.

Las técnicas utilizadas para el compostaje de residuos orgánicos son diversas, variando tanto por el contexto geográfico como por el grado de tecnicidad con el que se lleva a cabo el proceso. El producto resultante tiene la misma variabilidad, lo que depende de las condiciones iniciales de los residuos y del control de parámetros (fisicoquímicos y biológicos) que regulan el proceso,

dando lugar al concepto de calidad. La utilización del compost es heterogénea, pasando por su aplicación a especies arbustivas (parques y jardines) hasta su aplicación directa en siembras de hortalizas y vegetales de consumo humano; lo que no podría asegurarse como algo ambientalmente saludable debido a la carencia de información acerca de su calidad.

En este contexto, es necesario contar con estudios especializados que permitan conocer si los compost producidos a nivel de tratamiento municipal tienen la calidad aceptable para sus diversas aplicaciones, determinando parámetros físicos, químicos y microbiológicos; además de emplear pruebas experimentales que permitan conocer la calidad del compost. Los resultados obtenidos servirán, finalmente, para proponer medidas de orientación en la mejora u optimización de los diversos tratamientos para la obtención del compost y establecer los criterios de calidad según la aplicabilidad.

Frente a lo antes descrito, se formuló la siguiente interrogante:

¿Cuál es el grado de fitotoxicidad del compost producido por la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz, al ser aplicado en cultivos de trigo?

1.3. Hipótesis

La fitotoxicidad del compost producido por la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz es positiva y alta con relación al grado de madurez que este presenta al término del proceso productivo. Los ensayos biológicos con semillas de trigo (*Triticum spp*) permiten determinar el grado de fitotoxicidad del compost producido en la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar el grado de fitotoxicidad del compost producido por la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz, Ancash, al ser aplicado en el cultivo de trigo (*Triticum spp*).

1.4.2. Objetivos específicos

a. Caracterizar el compost producido por la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz.

b. Determinar el efecto tóxico germinativo del compost aplicado a semillas de trigo *(Triticum spp*).

c. Evaluar la calidad agronómica del compost producido en la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz.

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes

El compostaje de los residuos sólidos orgánicos es un proceso biotecnológico sumamente eficaz en la descomposición y estabilización de la materia orgánica como consecuencia de las actividades metabólicas combinadas de un conjunto de microorganismos cuyo crecimiento está condicionado por la temperatura de la masa, el porcentaje de humedad y la concentración de oxígeno; así como por la naturaleza variable del sustrato (Iglesias, 2003). En el proceso se puede diferenciar una fase bio-oxidativa, donde predominan las reacciones enzimáticas degradativas de las moléculas orgánicas (en condiciones termófilas fundamentalmente) y una fase de maduración, con reacciones de condensación y polimerización semejantes al proceso de humificación en el medio natural (Iglesias, 2003).

El destino del compost es su incorporación al suelo, debiendo mantener ciertas propiedades que le permitan aportar características benéficas durante su utilización agronómica. De ello se desprenden los conceptos de madurez, estabilización y fitotoxicidad.

La fitotoxicidad del compost es producida por determinados compuestos orgánicos fitotóxicos (amoniaco, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos solubles, etc.) que se forman durante la fase activa (fase bio-oxidativa) del compostaje (Iglesias, 2003). La fitotoxicidad puede deberse también a la presencia de altas concentraciones de metales pesados potencialmente fitotóxicos y/o una alta concentración de sales solubles de algunos residuos (Iglesias Jiménez, 2003).

De aplicarse un compost con un grado de madurez insuficiente las consecuencias para el sistema suelo-planta pueden ser severas, provocando no solo la inmovilización del N y de otros nutrientes esenciales, sino también la inhibición de la germinación de las semillas, alteraciones en la tasa metabólica de la planta y finalmente un efecto depresivo en el rendimiento de los cultivos (Ansorena, Batalla, & Merino, 2014; Iglesias Jiménez, 2003; Uribe Hernández, 2008). Por otro lado, la ausencia de fitotoxicidad en el producto final indicará el grado de madurez del compost (Garcia C. et al., 2014). Por tanto, la madurez del compost implica una relación directa con el crecimiento y desarrollo vegetal y, desde este punto de vista, el grado de madurez puede determinarse, por ejemplo, evaluando la respuesta vegetal (Iglesias Jiménez, 2003; Sullivan & Miller, 2001).

Queda abierta la posibilidad de desarrollar investigaciones que busquen determinar la relación entre el grado de madurez y los problemas de fitotoxicidad del compost, la relevancia del control del proceso de compostaje y, finalmente, la utilización agronómica del compost.

Se realizó la revisión de estudios sobre compostaje y fitotoxicidad del compost tanto en el ámbito internacional como nacional, citándose los siguientes como antecedentes:

Una investigación desarrollada en Huelva - España, tuvo como objetivo determinar la calidad media de los compost obtenidos en este municipio español (C10, para compost de granulometría menor a 10 mm y C25, para compost de granulometría menor a 25 mm), para lo cual plantearon una metodología que consistió en la toma de muestras de las pilas de compost elaborado ya dispuesto para su venta, para el análisis previo y la posterior evaluación de los parámetros seleccionados: determinaciones químicas (pH, CE, materia orgánica, nutrientes y metales pesados), determinaciones agronómicas (densidad real y aparente, capacidad de retención de agua y porosidad) y ensayos para determinar la madurez de los compost (ensayo de germinación) (Madrid, López, Cabrera, & Murillo, 2001).

Así mismo, en el contexto de la Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo llevada a cabo en España, se presentó un artículo en el que se explica que el compostaje es un proceso de transformación biológica, aerobia y controlada de residuos orgánicos del que se obtiene un producto final higienizado

y estabilizado. El compostaje es una actividad bastante difundida entre los agricultores en localidades españolas, tanto en la producción como en el uso del compost, pero que, en muchos casos, no se toman en cuenta los parámetros necesarios para hacer que la producción y el uso se den en condiciones controladas.

La autora hace hincapié en que es necesario conocer y saber interpretar los cambios producidos durante el proceso para seleccionar adecuadamente los parámetros a controlar para el seguimiento del proceso y/o para el control del compost. Además, detalla los parámetros físicos, químicos, y biológicos que determinan la calidad. Finalmente, comenta que es fundamental tratar residuos orgánicos con características determinadas: fracción orgánica procedente de recogida selectiva en origen (en el caso de aplicar el compostaje a residuos sólidos urbanos), controlar las condiciones y el desarrollo del compostaje, incluso, si se quiere, a un nivel industrial productivo, teniendo siempre presente que se trata de obtener compost con la finalidad de aplicarlo al suelo; considerar que los suelos, tengan el uso que tengan, tienen necesidad de que se les aplique periódicamente materia orgánica, pero de una determinada calidad. Esto significa ausencia de contaminantes y buena estabilidad. Y concluye indicando que, aplicar compost de mala calidad no mejorará los problemas, tanto en lo que se refiere a la gestión de residuos como a la gestión del suelo, y favorecerá la dispersión de contaminantes (Soliva, 2011).

En el I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos desarrollado en julio de 2008 en Castellón-España, se presentó una investigación en la que abordan la realidad de la generación y tratamiento de cerca de 500 hm^3 de aguas residuales, lo que supone una producción de casi 500 000 t/año de lodos, los cuales tienen un destino muy variado: depósito directo en vertederos, aplicación al terreno, valorización energética y compostaje. Los lodos sometidos a compostaje son los más utilizados, pudiéndose aplicar a suelos de regadío, jardinería o cultivos asociados. Determinaron la efectividad de lodos compostados en la fertilización de plantas de tomate, para ello obtuvieron el sustrato en un reactor de compostaje diseñado por el grupo INGRES de la Universitat Jaume I y, una vez comprobadas las características físico-químicas y biológicas del compost obtenido, se utilizó como fertilizante. Las plantas de tomate fueron cultivadas en diferentes sustratos conteniendo compost y/o fertilizante tradicional. En tres períodos vegetativos de desarrollo de las plantas

(floración, fructificación y maduración), se determinó el efecto de la adición del compost sobre el crecimiento, así como el estado nutricional (C, N, aniones y cationes) tanto en hoja como en tallo. Así mismo se estudió la posible acumulación de boro y metales pesados en esos cultivos, demostrándose niveles aceptables de estos metales para su utilización agrícola, tal y como lo indica la legislación vigente (Tojar et al., 2008).

Una investigación desarrollada por el departamento de Ingeniería y Suelos de la Universidad de Chile, indica que la madurez del compost se puede determinar mediante bioensayos de germinación con especies sensibles a metabolitos fitotóxicos, sustancias que debieron ser metabolizadas o inmovilizadas durante la fase de maduración del compostaje. En este estudio se evaluó la sensibilidad de lechuga (*Lactuca sativa* var. Cuatro estaciones) y rabanito (*Raphanus sativus* var. Cherry Bell) a los extractos obtenidos de residuos agroindustriales que estaban en la fase de maduración del proceso de compostaje. Con residuos de café instantáneo, mezcla de residuos de café instantáneo y de fruta seca y residuos vitivinícolas con guano broiler, se prepararon extractos en agua destilada en proporción 1:5 y se midió el porcentaje de germinación relativa, crecimiento radicular relativo e índice de germinación (IG) en ambas especies. Los resultados indican que el rabanito es más sensible a la presencia de fitotóxicos en esta fase del proceso de compostaje. Los valores de IG en ambas especies señalan que los residuos vitivinícolas con guano broiler presentan el mayor nivel de fitotoxicidad. Se concluyó que el IG fue una variable más sensible y completa para evaluar el grado de madurez química requerido en materiales compostados que se utilizarán como componente base para la elaboración de sustratos especializados de uso agrícola (Varnero, Rojas, & Orellana, 2007).

Finalmente, profesores de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires desarrollaron una investigación en la que determinaron la ecotoxicidad de compost obtenidos en distintos momentos del proceso de compostaje y la de otras enmiendas orgánicas. Los efectos fitotóxicos del compost se determinaron a través de bioensayos de germinación con *Lolium perenne* (ryegrass) y una especie arbustiva de la región pampeana, *Sesbania virgata*.

Se observaron que estos efectos se relacionaron directamente con el pH y la conductividad eléctrica. A pesar del efecto de los metales pesados, fenoles y amoníaco en la germinación, en este caso, ninguno de ellos pudo relacionarse con el índice de germinación (Zubillaga et al., 2008).

En nuestro país, las iniciativas de investigación en relación a la calidad del compost son diversas. Una de ellas es la desarrollada en Aucayacu, en la que se caracterizó el compost a nivel químico y ecotoxicológico para determinar si los valores se encuentran establecidos en las normas de referencia (Cesare, 2016).

Otro estudio desarrollado con el compost producido mediante la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos por tres municipios de la parte central de la selva amazónica (Leoncio Prado, Concepción y José Crespo y Castillo) tuvo como objetivo determinar su efecto tóxico germinativo y así conocer cuál es la proporción adecuada para su aplicación (Beteta, 2016).

Como parte de una propuesta para la elaboración de compost a partir de los residuos vegetales provenientes del mantenimiento de áreas verdes públicas del distrito de Miraflores – Lima, se evaluaron las variables físicas, químicas y biológicas además de la evaluación de la calidad del compost y de la rentabilidad de la propuesta de gestión, demostrando ser una alternativa sustentable (Cabrera & Rossi, 2016).

Una investigación que buscaba determinar la eficiencia del uso de materiales de soporte (corona de piña) en el proceso de compostaje de residuos vegetales de mercado concluyó que el compost obtenido mediante este tratamiento presenta mejores resultados en cuanto a su calidad, ya que durante el proceso se favorece la aireación y la estabilización, así como la reducción de los niveles de fitotoxicidad, en comparación con compost obtenido sin la utilización de la corona de piña como material estructurante (Quevedo, 2017).

2.2. Marco teórico

2.2.1. Residuos sólidos

Residuo sólido es cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien o servicio, del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención u obligación de desprenderse, para ser manejados priorizando la valorización de los residuos y en último caso, su disposición final (D. L. Nº 1278). Por su parte, Castillo (1998) sostiene que los residuos sólidos son las materias desechas o sobrantes que tienen carácter sólido o semisólido, putrescible o no putrescible, a excepción de las excretas humanas, puede ser cualquiera que posea suficiente consistencia para no fluir por sí mismo.

También se consideran residuos sólidos aquellos que siendo líquido o gas se encuentran contenidos en recipientes o depósitos que van a ser desechados, así como los líquidos o gases que, por sus características fisicoquímicas, no puedan ser ingresados en los sistemas de tratamiento de emisiones y efluentes y por ello no pueden ser vertidos al ambiente. En estos casos los gases o líquidos deben ser acondicionados de forma segura para su disposición final (D. L. Nº 1278).

Según el artículo 31 del D.L. N° 1278, los residuos se clasifican, de acuerdo al manejo que reciben, en peligrosos y no peligrosos, y según la autoridad pública competente para su gestión, en municipales y no municipales.

2.2.1.1. Residuos sólidos de Ámbito de Gestión Municipal

Los residuos sólidos del ámbito de la gestión municipal o residuos municipales, están conformados por los residuos sólidos domiciliarios y los provenientes del barrido y limpieza de espacios públicos, incluyendo las playas, actividades comerciales y otras actividades urbanas no domiciliarias cuyos residuos se pueden asimilar a los servicios de limpieza pública, en todo el ámbito de su jurisdicción (D. L. Nº 1278).

El artículo 22 del D.L. N° 1278 señala que: “Los municipios son responsables por la gestión de residuos sólidos de origen domiciliario, residuos especiales y similares en el ámbito de su jurisdicción”.

En relación con los residuos sólidos municipales especiales (artículo 43 - D.S. N° 014-2017-MINAM), estos pueden ser aquellos residuos provenientes de laboratorios de ensayos ambientales, lubricentros y los centros veterinarios; los residuos sólidos generados en eventos masivos como conciertos, ferias, concentraciones y movilizaciones temporales humanas, así como los residuos sólidos generados en centros comerciales y los residuos sólidos provenientes de actividades de construcción y demolición. La norma señala que estos establecimientos son los responsables de segregar y/o promover la segregación de los residuos sólidos diferenciándolos según su peligrosidad. Así mismo, establece que las municipalidades deberán establecer una tasa especial o por medio de una empresa operadora de residuos sólidos de tal manera que se garantice la adecuada gestión y manejo de los mismos.

Por su naturaleza o composición los residuos municipales tienen la capacidad de poder asimilarse por medio de mecanismos de reutilización, reciclado y valorización (Bernal & Gondar, 2007).

2.2.1.2. Residuos sólidos orgánicos

Los residuos sólidos orgánicos son el resultado de desechos de plantas y animales o de su transformación. Se caracterizan porque generalmente se descomponen con relativa facilidad en el ambiente (Tobón, Avalos, & Castañon, 2004).

La Real Academia Española (RAE, 2014) señala que los residuos orgánicos son los restos con contenido de carbono en combinación con otros elementos, principalmente el hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

En la práctica, los residuos orgánicos no son más que los restos de origen biológico, que alguna vez estuvieron vivos o fueron parte de un ser vivo, por ejemplo: cáscaras de frutas y hortalizas, los restos de la preparación de alimentos en el hogar, las malezas de los jardines, objetos de madera descompuestos, papeles y cartones, entre otros. Según el MINAM (2018), en el Perú, el 56% de los residuos sólidos generados son materia orgánica.

Estos residuos, por sus propiedades intrínsecas, a menudo son reutilizables y se pueden considerar como un recurso en otro marco (Prieto, 2003).

2.2.2. Abonos orgánicos

Los abonos orgánicos están constituidos por desechos de origen animal, vegetal o mixto; se agregan al suelo con la finalidad de mejorar sus características físicas, químicas y biológicas (Romero et al., 2004), las que se ven favorecidas con la aplicación constante de ellos en el tiempo (Santos, 2015).

Los abonos orgánicos se pueden clasificar según su fuente principal de nutrientes, los mismos que son liberados gracias a la actividad microbiana. Se subdividen a su vez en abonos orgánicos procesados (materia prima estabilizada) y no procesados (de aplicación directa, sin previa descomposición) (Iparraguirre, 2007).

Santos (2015) señala que los abonos orgánicos, por las propias características en su composición, son formadores del humus y enriquecen al suelo con este componente, modificando algunas de sus propiedades y características, haciéndolo apropiado para el buen desarrollo y rendimiento de los cultivos.

Tabla 01: Tipos de abonos orgánicos.

Fuente de nutrientes	Grado de procesamiento	Sólidos	Líquidos
Materia orgánica	Sin procesar	Desechos vegetales, desechos de animales, gallinaza, estiércol fresco de vacuno, cerdo y cuy; abonos verdes (leguminosas fijadoras de nitrógeno).	Efluentes: pulpa de café
	Procesados	**Compost,** lombricompost, bokashi, ácidos húmicos.	Biofermentos, té de compost, ácidos húmicos, té de estiércol, extracto de algas.
Microorganismos		Biofertilizantes inoculante en turba de *Rhizobium* para leguminosas, micorrizas, *Bacillus subtilis*	Biofertilizantes líquidos, microrganismos eficientes o microrganismos benéficos, etc.

Fuente: Soto & Meléndez, 2004.

Por los efectos favorables que los abonos orgánicos proporcionan al suelo, estos deberían ser imprescindibles en el uso y manejo de este recurso para mejorar y mantener su componente orgánico, sus características físicas, químicas y biológicas y finalmente su productividad.

Tabla 02: Resumen de los efectos de los abonos orgánicos sobre las características del suelo.

Características físicas	Características químicas	Características biológicas
▪ Estructura ▪ Porosidad ▪ Aireación ▪ Capacidad de retención de agua ▪ Infiltración ▪ Conductividad hidráulica ▪ Estabilidad de agregados	▪ Contenido de materia orgánica ▪ Incremento del porcentaje de Nitrógeno total ▪ Capacidad de Intercambio catiónico (CIC) ▪ pH ▪ Concentración de sales	▪ Los microrganismos influyen en las propiedades del suelo y también ejercen efectos directos en el crecimiento de las plantas. ▪ Mejora de la disponibilidad de nutrimentos.

Nota: La composición química de los abonos orgánicos varía de acuerdo al origen de estos. Elaboración propia.

Fuente: Santos (2015).

A su vez, los abonos orgánicos pueden prevenir y controlar la presencia y severidad de las enfermedades del suelo, esto a través del incremento de la capacidad biológica del suelo para amortiguar los patógenos; reducción del número de patógenos por la competencia que se establece con los microrganismos no patógenos del suelo; aumento en el contenido de nitrógeno amoniacal en el proceso de mineralización del abono orgánico; incremento de la capacidad de los hospedantes para provocar rechazo hacia los patógenos. Al aplicar materiales orgánicos al suelo, se promueve el crecimiento de raíces y la absorción de nutrimentos con repercusión en el rendimiento. La diversidad de la microflora en o alrededor de las raíces en estos cultivos aumenta y se correlaciona negativamente con la incidencia de enfermedades radiculares de las plantas (Santos, 2015; Soto & Meléndez, 2004).

2.2.3. Compostaje

El compostaje es un proceso biológico que asegura la transformación de los componentes orgánicos de subproductos y residuos en compost, un producto orgánico rico en compuestos húmicos (Solivá et al., 2007).

El compostaje es una tecnología de tratamiento sencilla y económica. Se puede aplicar tanto a gran escala (a nivel empresarial o municipal) como individualmente (en jardines) (Röben, 2002). Su objetivo es la degradación rápida y transformación de componentes orgánicos en sustancias húmicas estables, pero con baja pérdida de sustancias benéficas (Binner et al., 2016).

Su utilización es bastante difundida a lo largo de la historia de la agricultura. Siempre que el proceso se controle correctamente, los residuos orgánicos que se compostan se reducirán, estabilizarán e higienizarán (Soliva, 2011).

Este complejo proceso está regido por la acción de una amplia y diversa población microbiana. Bacterias y hongos determinan, a través de sus capacidades metabólicas, las propiedades fisicoquímicas que condicionan el desarrollo del proceso (Anastasi, Varese, & Filipello Marchisio, 2005).

El proceso de compostaje (Figura 01) normalmente se desarrolla en dos etapas: la descomposición (fase bio-oxidativa) y la maduración (Moreno & Mormeneo, 2008). La etapa de descomposición se produce al comienzo del proceso y corresponde a la transformación de la materia orgánica fácilmente biodegradable en moléculas orgánicas e inorgánicas simples por la actividad metabólica de los microorganismos. Esta etapa se caracteriza por la producción de calor y por las elevadas tasas de consumo de oxígeno (Haug et al., 1993). La actividad metabólica de los microorganismos incluye el uso de su batería de enzimas, o incluso la producción de enzimas para degradar la materia orgánica y obtener los nutrientes necesarios para adaptarse a su desarrollo. En el periodo inicial, los microorganismos dominantes son mesófilos (10 a 42°C), utilizan el oxígeno disponible para oxidar el carbono de la matriz sólida y así obtener energía y materiales para construir nueva biomasa y producir CO_2 y agua. Este crecimiento produce calor y la temperatura de la matriz se eleva sobre 45°C. A estas temperaturas los microorganismos mesófilos mueren o se vuelven inactivos (Haug et al., 1993). En consecuencia, en este punto los microorganismos termófilos se activan, consumiendo los materiales que son fácilmente disponibles y multiplicándose rápidamente. La temperatura puede alcanzar valores de hasta 70°C. Esta es la fase termófila, es muy importante para la inactivación de patógenos y la destrucción de las semillas (Moreno & Mormeneo, 2008; Soliva, 2001).

La etapa de maduración sucede cuando las fuentes de carbono fácilmente disponibles se agotan, la actividad termófila disminuye y la temperatura baja. Es cuando los microorganismos mesófilos comienzan a dominar el proceso hasta que las fuentes de energía disponibles se hayan consumido por el agotamiento de los compuestos fácilmente biodegradables (Haug et al., 1993; Moreno & Mormeneo, 2008). Finalmente, el material llega a temperatura ambiente.

Esta etapa es importante porque es cuando el nitrógeno obtenido de la biomasa transformada se incorpora en compuestos de alto peso molecular que son resistentes a la descomposición microbiana, formando una reserva de nitrógeno (Haug et al., 1993).

Mora (2006) explica que durante el proceso de maduración del compost, se produce el fraccionamiento de estructuras polifenólicas y lignínicas y la policondensación de sustancias precursoras para la formación de sustancias húmicas. Esto con el objeto de propiciar la formación de posiciones de adsorción que retengan cationes polivalentes y se formen complejos organominerales de mayor capacidad de intercambio catiónico.

Así, la incorporación de sustancias húmicas al suelo provenientes de un compost maduro, permitirá retener nutrientes, sincronizándose la liberación de los mismos con las necesidades de extracción de las plantas y disminuyendo las pérdidas por lixiviación, a la vez que incorporan determinadas moléculas fitotóxicas a la fracción de ácidos húmicos (Zucconi, Monaco, & Forte, 1985).

Iglesias et al. (2008) plantean el ratio AH/AF como índice de humificación, constituyéndolo como un parámetro para deducir el grado de madurez del compost. Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) propusieron un valor mínimo de 1.9 (en compost de RSU) para este ratio.

La generación de residuos sólidos presenta un crecimiento constante y su composición es muy variable, dependiendo del tamaño de la población (si se trata de residuos sólidos urbanos), siendo la materia orgánica la fracción más importante de los mismos, que supone aproximadamente la mitad de los residuos generados (Flotats & Solé, 2007).

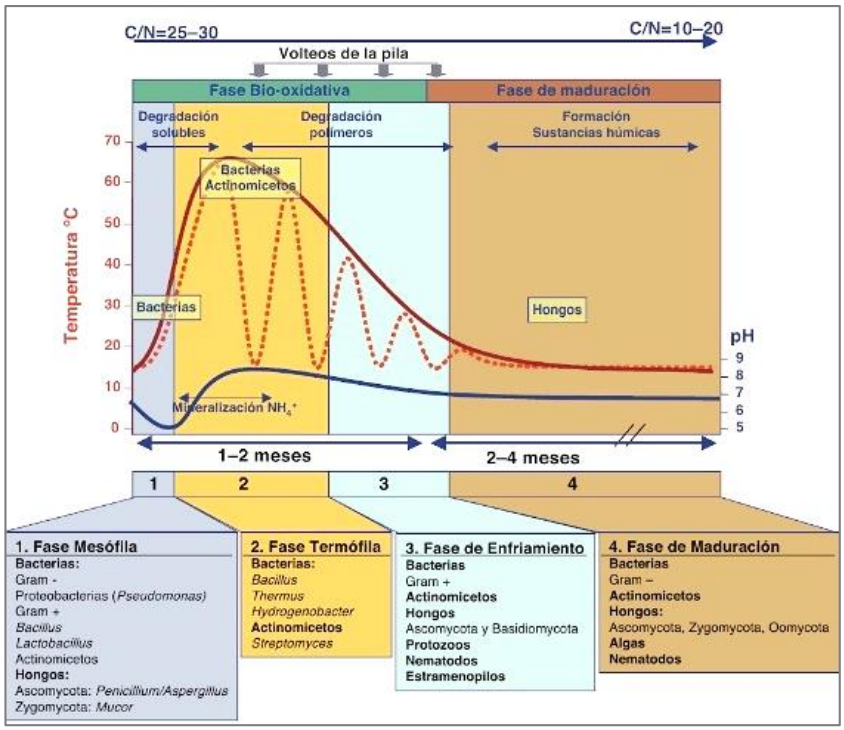


Figura 01: Sucesión microbiana y evolución de la temperatura, relación C/N y pH durante el compostaje.
Fuente: Moreno & Mormeneo (2008).

El flujo para estos residuos biodegradables de origen municipal parte de la producción. A medida que la cantidad producida aumenta, su gestión se hace más crítica, siendo una de las mejores opciones la reducción en la generación de estos. Dichos residuos son recolectados, siendo determinante, en este punto, el hecho de que los residuos hayan sido separados en origen o que provengan de la mezcla de todos los residuos generados. Las opciones de tratamiento disponibles dependen, en gran medida, del modo en que los residuos sólidos han sido recogidos. Para los residuos provenientes de la recogida selectiva las opciones son amplias, desde tecnologías relativamente simples como el compostaje hasta opciones de tratamientos térmicos complejos como la gasificación o la pirolisis, siendo clave para decidir el tipo de tratamiento la disponibilidad del mercado para los productos recuperados (Crowe et al., 2002; Flotats & Solé, 2007).

En la Tabla 03 se presentan algunos de los métodos de tratamiento para los residuos orgánicos y en la Tabla 04 se presentan las principales ventajas e inconvenientes para cada tratamiento:

Tabla 03: Tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos urbanos biodegradables.

	Métodos biológicos		Métodos térmicos		
	Compostaje	**Digestión anaerobia**	**Incineración**	**Pirolisis**	**Gasificación**
Tecnología probada, registros	Sí, muy común	Sí, muy común	Sí, muy común	Parcial, pocos	Parcial, pocos
Principio básico	Degradación por microorganismos aerobios	Degradación por microorganismos anaerobios	Combustión	Conversión termoquímica anaerobia	Conversión termoquímica
Costo del tratamiento	Bajo - Alto	Medio - Alto	Medio - Alto	Medio - Alto	Alto – Muy alto
Idoneidad	Buena	Buena	Buena	Media	Depende de la tecnología
Residuos aceptados	Residuos separados en origen para la recuperación de materia y nutrientes	Residuos separados en origen húmedos para la recuperación de materia y nutrientes	Todos los residuos ya que las tecnologías de limpieza del aire son buenas	En particular para fracciones secas de residuos contaminados bien definidos	Residuos separados en origen o todos si combinados con otras tecnologías
Aceptación de residuos domésticos secos	Sí	Sí	Sí	Posible, pero normalmente no	Posible, pero normalmente no
Aceptación de residuos domésticos húmedos	Sí	Sí	Sí	Sí	Posible
Aceptación de residuos de parques y jardines	Sí	No	Sí	Sí	Posible
Aceptación de residuos de hoteles y restaurantes	Sí	Sí	Sí	Sí	Posible, pero normalmente no
Aceptación de papel y cartón	Pequeñas cantidades de papel posible	No	Sí	Sí	Posible
Fracciones de residuos excluidas	Metales, plástico, vidrio	Metales, plástico, vidrio, restos vegetales	Ninguno	Residuos domésticos húmedos	Residuos domésticos húmedos
Control de olores	Malo-bueno	Malo-bueno	Bueno	Medio-bueno	Bueno
Recuperación de energía	No	3200 MJ/t	2700 MJ/t	Aprox. 70% de incineración + energía contenida subproductos	2700 MJ/t
Ciclo carbono (% peso)	50% Compost 50% aire	75% líquido 25% Biogás	1% sólidos 99% aire	20-30% sólidos 70-80% aire	2% sólidos 98% aire
Recuperación de nutrientes (kg/t)	2.5 – 10 kg N 0.5 – 1 Kg P 1 – 2 Kg K	4.0 – 4.5 kg N 0.5 – 1 Kg P 2.5 – 3 Kg K	No	No	No

Fuente: Flotats & Solé (2007)

Tabla 04: Ventajas e inconvenientes de las tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos urbanos biodegradables.

Tratamiento	Ventajas	Inconvenientes
Compostaje	▪ Posibilidad de tecnología simple, barata y robusta. ▪ Recuperación del 50% de la masa (peso) y de nutrientes. ▪ Producción de sustancias húmicas, microorganismos beneficiosos y nitrógeno de liberación lenta. ▪ Elimina semillas y patógenos. ▪ Posibilidad de buenas oportunidades para el control del proceso.	▪ Requiere separación en origen. ▪ Se necesita desarrollar y mantener un mercado para el compost. ▪ Emisión periódica de olores, especialmente en el caso de residuos sólidos urbanos biodegradables. ▪ Pérdidas de 20-40% de nitrógeno en forma de amoniaco, y de 40-60% de carbono en forma de dióxido de carbono.
Digestión anaerobia	▪ Posibilidad de recuperación de nutrientes. ▪ Producción de energía. ▪ Reducción de olores.	▪ Requiere separación en origen. ▪ La fracción sólida requiere un compostaje o tratamiento adicional. ▪ Se necesita desarrollar y mantener un mercado para el fertilizante líquido.
Incineración	▪ Proceso muy conocido y de elevada implantación. ▪ Recuperación energética de hasta el 85%. ▪ Cualquier tipo de residuo municipal puede ser tratado. ▪ Se reduce el volumen del residuo a 5-10%. ▪ Producción energía neutral para CO_2, sustitución de combustibles fósiles.	▪ Inversiones muy elevadas. ▪ Necesidad de un sistema de tratamiento de gases de elevado coste. ▪ Generación de cenizas y productos de la limpieza de gases que deben ser llevados a vertedero. ▪ Generación de NOx y otros gases.
Pirolisis	▪ Mejor retención de metales pesados. ▪ Menor cantidad de gas residual que en la incineración. ▪ Sin formación de dioxinas o furanos. ▪ Adecuado para fracciones de residuos difíciles. ▪ Producción de energía neutral con CO_2, sustitución combustibles fósiles.	▪ Requerida trituración para evitar bloqueo de los sistemas de alimentación y transporte. ▪ Aceites pirolíticos contienen componentes tóxicos y cancerígenos, que normalmente se descomponen durante el proceso. ▪ El residuo sólido contiene 20-30% del poder calorífico. ▪ Elevados costes.
Gasificación	▪ Alto grado de recuperación (85%) y buen uso del residuo como fuente energética. ▪ Producción energía neutral para CO_2, sustitución de combustibles fósiles. ▪ Mejor retención de metales pesados que otros procesos. ▪ Menor cantidad de gas residual que en la incineración. ▪ Proceso adecuado a madera contaminada.	▪ Requerida trituración para evitar bloqueo de los sistemas de alimentación y transporte. ▪ Limpieza del gas para uso de motor complicada. ▪ El residuo sólido puede contener carbono no procesado. ▪ Generación de NOx. ▪ Elevados costes. ▪ Baja implantación.

Fuente: Flotats & Solé (2007).

2.2.3.1. Compost

Es el producto de la transformación biológica y controlada de mezclas adecuadas de materiales orgánicos. Debe presentar cierta homogeneidad, color oscuro y olor a tierra de bosque. Su composición, características y propiedades dependerán de los residuos de partida y de la duración del proceso; así como de la tecnología aplicada (Ansorena et al., 2014; Soliva, 2011).

Una definición agronómica para el compost lo señala como un material sólido, que ha sido higienizado y estabilizado por un proceso de tratamiento biológico (Ansorena et al., 2014).

Elaborado correctamente, el compost es un producto que puede colaborar en el mejoramiento de las condiciones edáficas y así obtener una mejora en la producción de cultivos (Garcia et al., 2014).

2.2.3.2. Tipos de compost

Las características y propiedades del compost dependen tanto de las materias primas, subproductos o residuos de partida como del proceso de compostaje, variables que difieren según el origen, la época del año, las condiciones climatológicas, el carácter rural o urbano de los lugares de procedencia, la densidad poblacional, el sistema de recogida, etc. (Ansorena et al., 2014). Una clasificación aceptada de los tipos de compost es aquella que se realiza atendiendo al origen de sus materias primas (Alarcón, 2004):

- Compost de maleza.
- Compost de maleza y broza.
- Compost de material vegetal con estiércol.
- Compost tipo Quick – Return. Elaborado por restos vegetales, a los que se les ha añadido rocas en polvo, algas calcáreas, activador Quick – Return, paja y tierra.
- Compost de fracción orgánica de los residuos municipales.
- Compost de la fracción orgánica de los residuos municipales con restos vegetales.

- Compost de la fracción procedente del tratamiento anaeróbico de residuos municipales.
- Compost de lodos de depuradora, con restos vegetales, de poda, serrines, cenizas o restos de corteza.
- Compost de la fracción orgánica de los residuos procedentes de la industria de producción de alimentos o agroindustria.
- Compost de cualquier naturaleza activado con levadura de cerveza.
- Compost de excretas animales.

Sin embargo, dados los avances de investigación sobre el compost debemos de considerar que esta clasificación puede variar, atendiendo a otros criterios de valoración, tales como calidad del producto, el nivel de tecnología empleada en el proceso de producción (Cabrera & Rossi, 2016), así como los criterios legales, que son válidos para el compost industrial (Garcia et al., 2014).

Sea cual fuere el origen de los materiales a compostar y el destino del producto final, los requerimientos generales deben encaminarse a conseguir: aspecto y olor aceptables, correcta higienización, bajos niveles de impurezas y contaminantes, niveles óptimos de componentes útiles para el suelo y una cierta regularidad en las características (Soliva & López, 2004).

2.2.3.3. Proceso de elaboración del compost

a. Factores que determinar el proceso de compostaje

El proceso de formación del compost está determinado por la acción de diversos microorganismos aerobios (Haug et al., 1993), los que actúan sobre la materia orgánica, uno tras otro, en función de la influencia de determinados factores, generándose un incremento en la temperatura, reducción del volumen y peso inicial de los residuos, provocando su humificación y oscurecimiento (Bueno et al., 2008; Nakasaki, Nag, & Karita, 2005). El proceso lo determina también el tipo de sistema empleado y las operaciones propias de cada sistema.

Existen varios sistemas de compostaje. Estos pueden ser según la movilidad que se conceda al material a compostar (sistemas estáticos y dinámicos); según la forma física en la que se dispone el material (pilas, trincheras, mesetas, zanjas, etc.); pero la más común se realiza en función al aislamiento del material a compostar con respecto al exterior: sistemas abiertos, sistemas semi-cerrados y sistemas cerrados (Tabla 05). En ellos, la variable en la que se incide es el suministro de oxígeno mediante diferentes métodos de aireación (Chica & García, 2008).

En las instalaciones de compostaje se desarrollan un conjunto de operaciones diferentes que producen compost y una serie de subproductos a partir de distintas materias primas. En la Figura 02 se presenta un diagrama de flujo genérico de una instalación de compostaje en la que se distinguen dichas operaciones:

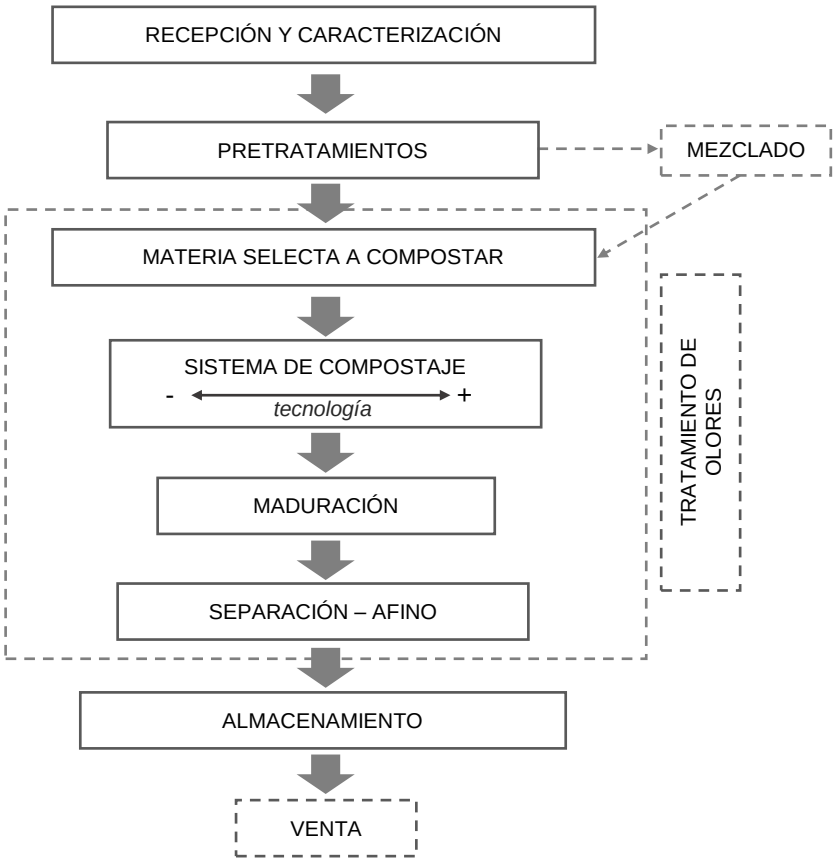


Figura 02: Representación esquemática de las principales operaciones y/o etapas del proceso de compostaje.

Según Chica & García (2008), el compostaje presenta las siguientes operaciones y/o etapas:

- Pretratamiento: debido a la heterogeneidad de las materias primas se necesita un pretratamiento (tratamiento mecánico) con el fin de proveer una materia con condiciones para favorecer el desarrollo del proceso, es decir, libre de impurezas inorgánicas, los áridos y los metales. Esta operación se puede hacer mediante maquinaria específica o mediante selección manual (Richard, 1992).

- Mezclado: Es posible mezclar la materia que se va a compostar con otros residuos, bien porque se reciban corrientes de diferentes tipos de material en la planta o bien porque se reutilice parte de rechazo que se produce en el afino final, como material estructurante o cobertura anti olor.

- Maduración: es una fase posterior al proceso fermentativo, en la que la velocidad de descomposición decrece y la temperatura disminuye hasta valores cercanos a los ambientales. Esta no tiene que ser una operación separada, sino más bien una parte integrada del sistema principal de compostaje. No se puede determinar con precisión la frontera entre el compostaje activo y la maduración, por lo cual no debe permitirse un nivel menor de gestión. La fase de maduración no debe ser un almacenamiento temporal para el posterior empleo del compost (venta), sino que se una fase en la que se producen biotransformaciones de compuestos que se degradan lentamente. Hay pocos estudios centrados en esta fase pues el producto que se considera en maduración suele conservase con niveles de humedad muy bajos, que detienen los procesos biológicos, dando la impresión de que el proceso ha finalizado. Sin embargo, si estos materiales se voltean y riegan, suelen alcanzarse elevadas temperaturas en su interior, lo que demuestra la no finalización del proceso, con la posibilidad evidente de que se reinicie al suministrar el compost a los suelos.

- Afino: al final del proceso se requiere una nueva separación que permita retirar los restos de fracciones indeseables que puedan estar presentes en el compost maduro.

Tabla 05: Principales sistemas de compostaje.

SISTEMAS ABIERTOS	
Características	**Tipos**
- De bajo coste, tecnología sencilla, aplicable a pequeñas ciudades o medianas comunidades de zonas en las que la disponibilidad del terreno sea elevada, - Las características meteorológicas de la zona son determinantes para el desarrollo del proceso. - La forma de amontonamiento del material es variada (pilas, mesetas, zanjas, etc.) y con dimensiones determinadas. - Los sistemas de manipulación más comunes son los dinámicos (por medio de dispositivos especiales – *volteadoras*, o con maquinaria específica – *palas mecánicas*). Pero también los hay con sistemas estáticos (sistemas de aireación pasiva o forzada) - Para estos tipos de sistemas, la mezcla de materiales a compostar se colocan en hileras o pilas de sección triangular o trapezoidal. La forma y relación altura/anchura dependerá del ángulo estático propio del material a tratar (si el material tiene estructura alcanzará mayor altura y viceversa).	*Hileras con volteo:* Sistema de hileras largas y estrechas que son regularmente volteadas y que se airean pasivamente. *Pilas estáticas aireadas pasivamente:* Pilas que no se voltean o lo hacen con poca frecuencia y son aireadas pasivamente, suelen contar con ayudas pasivas a la aireación como tuberías perforadas o cámaras de aire. *Pilas estáticas aireadas:* Pilas dispuestas a voluntad en hileras o mesetas, o simples contenedores abiertos con aireación forzada (suministrando O_2, enfriando la pila y eliminando el vapor de agua, CO_2 y otros productos de descomposición), sin volteo. La humedad debe ser cuidada y mantenida en los niveles adecuados). Por lo general, estas estructuras suelen tener una base de entre 3 y 4 metros como máximo, una altura de unos 2 – 2,5 metros, y una longitud de unos pocos a unas varias decenas de metros.
SISTEMAS SEMI-CERRADOS	
- El conjunto de operaciones se lleva a cabo dentro de una gran nave cubierta y cerrada que dispone de un sistema de extracción de la atmósfera interior (rica en gases de fermentación) a través de tuberías colocadas a lo largo del techo, que es tratada por medio de biofiltros. - Estos sistemas están concebidos para atender poblaciones medianas o grandes, diseñadas para ser instaladas en las cercanías de la propia población.	*Sistemas con combinación de la aireación forzada y volteo:* trincheras con aireación forzada, donde los materiales se colocan entre muretes longitudinales y son volteados por distintos procedimientos y con una cierta regularidad. Esta disposición permite realizar un seguimiento y control de la temperatura, la humedad y el nivel de oxígeno con las mejoras que suponen los volteos periódicos, el riego simultáneo al volteo y la posibilidad de airear selectivamente unas zonas más que otras para ajustarse a las necesidades del sistema.
SISTEMAS CERRADOS O EN REACTORES	
- Los reactores son estructuras por lo general metálicas: cilíndricas o rectangulares; y que pueden ser estáticas o dinámicas. - El material a compostar no está nunca en contacto directo con el exterior, sino a través de un sistema de conductos o turbinas. - Se facilita el tratamiento de olores generados durante la fermentación. - El desarrollo de estos sistemas ha favorecido el uso del compostaje como una tecnología moderna de tratamiento de la materia orgánica. - Estos sistemas permiten un mejor registro, mayor control y posibilidades de optimización de las variables del proceso, lo que conlleva a una degradación más rápida y completa con un mínimo impacto ambiental de las instalaciones.	*Lechos horizontales agitados:* Los materiales se compostan en lechos estrechos, cuentan con aireación forzada y movimiento continuo (túneles dinámicos). *Contenedor aireado:* Diversas configuraciones de contenedores con aireación forzada y funcionamiento en discontinuo (túneles estáticos) *Contenedores aireados-agitados:* Contenedores con aireación forzada, agitación y movimiento continuo. *Reactores torre o silos:* Contenedores con aireación forzada y verticalmente orientados, con movimiento continuo de materiales, generalmente en la parte inferior. *Tambores rotatorios:* Tambores/cilindros horizontales que rotan lentamente y que ya sea de forma constante o intermitente voltean los materiales y los mueven a través de sistema. La rotación expone al material al aire fresco, intercambiando O2, liberando calor y diversos productos gaseosos de la descomposición.

Nota: Elaboración propia, adaptado de Chica & García (2008).

b. Parámetros esenciales para un óptimo proceso de compostaje

Al estar regido por los ciclos biológicos de los microorganismos, el compostaje requiere un tiempo mínimo en el que se deben controlar las variables necesarias, las mismas que pueden clasificarse en aquellas que han de ser medidas durante todo el proceso y aquellas que han de ser medidas fundamentalmente al inicio del proceso (Bueno et al., 2008; Jeris & Regan, 1973; Madejón et al., 2001).

Tabla 06: Parámetros esenciales para un óptimo proceso de compostaje.

Parámetros de seguimiento	Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato
Temperatura Humedad pH Aireación	Tamaño de partícula Relación C/N Nutrientes Materia orgánica Conductividad eléctrica

Nota: Los valores óptimos estarán influenciados por las condiciones ambientales, el tipo de residuo a tratar y el sistema de compostaje elegido.

- **Parámetros de seguimiento**

  - ✓ **Temperatura:**

    Al disponer el material a compostar en pilas, en un reactor o en el sistema elegido para desarrollar el proceso, si las condiciones son las adecuadas, se dará inicio a la actividad microbiana. Inicialmente todo el material está a la misma temperatura, pero que aumentará a medida que la población microbiana crece y se desarrolla (Bueno et al., 2008).

    De acuerdo con este parámetro la descomposición aerobia puede dividirse en tres fases o etapas: fase mesófila inicial ($T < 45°C$), fase termófila ($T > 45°C$) y fase mesófila final, considerándose finalizado el proceso cuando se alcanza de nuevo la temperatura inicial. Cada especie de microoganismo tiene un intervalo de temperatura óptima el que su actividad es mayor y más efectiva:

Tabla 07: Microorganismos: características e intervalos de temperatura óptima.

Rango de temperatura	Tipo de microorganismo	Característica
15 – 40 °C	Microorganismos mesófilos	Normalmente se encuentran en el suelo vegetal y producen ácidos.
40 – 70 °C	Microorganismos termófilos	Son responsables de la degradación de proteínas, lípidos y grasas.

Fuente: Ingelmo & Rubio (2008).

Para autores como Moreno y Mormeneo (2008), desde el punto de vista microbiológico, las temperaturas óptimas del proceso se encuentran entre 45 – 59 °C. Temperaturas menores de 20 °C frenan el crecimiento microbiano y, por tanto, la descomposición de los materiales. Por otro lado, si la temperatura es superior a 59 °C se inhibe el desarrollo de gran parte de los microorganismos o provoca su eliminación, reduciéndose la tasa de descomposición microbiana.

Los microorganismos que resulten beneficiados a una temperatura concreta son los que principalmente descompondrán la materia orgánica del residuo, produciéndose un desprendimiento de calor. Este calor provoca una variación de la temperatura de la pila que dependerá de la adecuación de los demás factores a los intervalos óptimos, del tamaño de la pila, de las condiciones ambientales y del tipo de adición de aire a la pila (Bueno et al., 2008).

Respecto de las variaciones de temperatura y de su adecuación a los intervalos óptimos en función del tamaño de la pila, Malwana et al. (2013) refieren que para alcanzar temperaturas termófilas, las pilas de compostaje deberán tener una relación área superficial (SA) a volumen (V) menor que 1. Señalan también que, mientras más baja sea la relación SA/V, las pilas de compostaje mostrarán un mejor rendimiento (basado en el calor generado por los valores de temperatura en el rango termófilo).

El hecho de que las pilas de compostaje tengan una relación SA/V < 1 hace que estas necesiten volteos con mayor frecuencia para asegurar su correcta aireación y la homogenización de la temperatura, evitándose así problemas de compactación, disminución de poros (espacios de aire libre), generación de entornos anaerobios, desaparición y/o inhibición de microbiota termófila y finalmente la paralización del proceso degradativo.

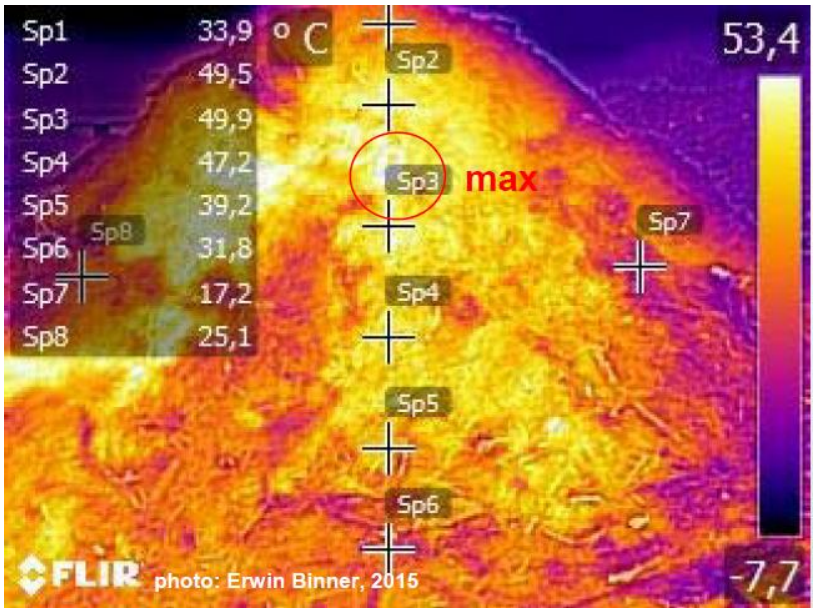


Figura 03: Variación de la temperatura en una ruma de compost.

La temperatura interesa, además, porque determina la sanitización del material, ya sea por las altas temperaturas alcanzadas –que provocan la muerte de microorganismos patógenos– o por la generación de antibióticos que algunos microorganismos producen, dadas las condiciones óptimas (Galea, 2013).

- ✓ **Humedad:**

La presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que es el medio de transporte de sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de deshecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso (Bueno et al., 2008).

Tabla 08: Rangos de humedad y sus características.

Rango de humedad	Característica
< 30%	La actividad biológica decrece
50 - 70%	Humedad óptima
> 70%	El agua desplaza el aire en los espacios libres existentes entre las partículas, impidiendo la circulación de los gases formados en la reacción y reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis

Cuando las condiciones se hacen anaerobias los microorganismos cambian su tipo de producción de energía hacia procesos fermentativos, mucho menos eficientes energéticamente (menos producción de calor, procesos más lentos), los cuales generan productos secundarios indeseables (metano y sustancias generadoras de malos olores) (Moreno & Mormeneo, 2008). El exceso de humedad puede ser reducido con una mayor aireación (Haug et al., 1993).

La humedad de los materiales es una variable importante en el compostaje. Así, se ha encontrado que, para residuos sólidos urbanos, está entre 50 y 55% (Haug et al., 1993).

A su vez, con un buen control de la humedad y de la aireación, puede llevarse a cabo el control de la temperatura. Schulze (1962), quien estudió (en un reactor cerrado a temperatura constante) la variación de la cantidad de oxígeno consumido por una masa inicial durante el compostaje, determinando que pequeñas variaciones de humedad provocaban grandes cambios en la temperatura.

- ✓ **pH**

Este parámetro tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. La actividad metabólica de los microorganismos presentes en la pila de compostaje condiciona variaciones en los valores de pH, que a su vez

dependen en gran medida del valor de pH de las materias primas (Bueno et al., 2008).

Tabla 09: Procesos microbianos en función del rango de pH.

Rango de pH	Microrganismo
< 6	Los procesos de descomposición bacteriana se detienen.
6 – 7.5	Óptimo para bacterias
5.5 - 8	Óptimo para hongos que degradan lignina y celulosa.
> 9	Favorece la conversión del nitrógeno en amoníaco, alcalinizando el medio y afectando negativamente al crecimiento y actividad de los microorganismos.

La evolución del pH en el compostaje presenta tres fases: durante la fase mesofílica inicial se observa una disminución del pH (valores en torno a 5) debido a la acción de los microorganismos (principalmente bacterias) sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. En este momento la actividad de los hongos ácido tolerantes juega un papel importante (Moreno & Mormeneo, 2008). Eventualmente, esta bajada inicial del pH puede ser muy pronunciada si existen condiciones anaeróbicas, pues se formarán aún más cantidad de ácidos orgánicos.

En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio (hasta alcanzar valores en torno a 8.5), debido a la utilización microbiana de los ácidos orgánicos, y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero, Roig, Paredes, & Bernal, 2001). Y en la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón (Bueno et al., 2008).

La medida de pH es sólo una aproximación del pH *in situ*, puesto que se realiza en el laboratorio sobre el extracto acuoso de las muestras tomadas de las pilas (Sundberg, Smårs, & Jönsson, 2004).

- ✓ **Aireación:**

La presencia de oxígeno es necesaria para un correcto desarrollo del proceso, ya que los microorganismos que en él intervienen son aerobios.

Las pilas de compostaje presentan porcentajes variables de oxígeno en el aire de sus espacios libres: la parte más externa contiene casi tanto oxígeno como el aire (18 – 20%); hacia el interior el contenido de oxígeno va disminuyendo, mientras que el de CO_2 va aumentando, hasta el punto de que a una profundidad mayor de 60 cm el contenido de oxígeno puede estar entre 0.5 y 2% (Ekinci, Keener, Elwell, & Michel, 2004).

Una aireación insuficiente provoca una sustitución de los microorganismos aerobios por anaerobios, con el consiguiente retardo en la descomposición, la aparición de sulfato de hidrógeno y la producción de malos olores (Bidlingmaier & Müsken, 2007). El exceso de ventilación podría provocar el enfriamiento de la masa y una alta desecación con la consiguiente reducción de la actividad metabólica de los microorganismos (Zhu, 2006).

El método de compostaje determina cómo tiene que ser realizado el mecanismo de aireación. Así, la aireación puede ser pasiva o natural (tiene lugar por difusión y movimiento natural del aire); o forzada (a través de ventiladores, soplantes o a través de la aspiración de aire que se mueva a través de los materiales que se están compostando (Chica & García, 2008).

Durante el proceso de maduración no deben hacerse aportaciones adicionales de oxígeno, ya que una excesiva aireación podría dar lugar a un consumo de compuestos húmicos formados y a una rápida mineralización de los mismos (Tomati, Madejon, & Galli, 2000).

- **Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato**

  - ✓ **Relación C/N:**

    Es un factor importante que influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio durante el compostaje. Para un correcto proceso, en el que se aproveche y retenga la mayor parte del C y del N, la relación C/N del material de partida debe ser la adecuada. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada parte de N; por esta razón se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25 – 35 (Jhorar, Phogat, & Malik, 1991). Si la relación C/N es mayor que 40 la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso, debido a la deficiente disponibilidad de N para la síntesis proteica de los microorganismos. Para eliminar el exceso de carbono (en forma de anhídrido carbónico) es necesaria la aparición sucesiva de diversas especies microbianas. Al morir estos microorganismos el nitrógeno contenido en su biomasa se recicla y la relación C/N tiende a disminuir. Si el residuo tiene una alta relación C/N, pero la materia orgánica es poco degradable, la relación C/N disponible realmente para los microorganismos es menor y el proceso evolucionará rápidamente, pero afectará sólo a una proporción de la masa total. Si la relación C/N es muy baja el compostaje es más rápido pero el exceso de nitrógeno se desprende en forma amoniacal, produciéndose una autorregulación de la relación C/N del proceso (Bueno et al., 2008).

  - ✓ **Nutrientes:**

    Considerando que la utilidad agronómica de los residuos con posibilidad de ser compostados está en función de la disponibilidad de los elementos nutritivos que posean (Kiehl, 1985), la característica química más importante de los sustratos será su composición elemental.

Destacan el C, N y P, que son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano:

Tabla 10: Nutrientes y su importancia en el desarrollo microbiano.

Carbono	Es el elemento que debe estar presente en mayor cantidad puesto que constituye el 50% de las células de los microorganismos y el 25% del anhídrido carbónico que se desprende en la respiración.
Nitrógeno	Es esencial para la reproducción celular debido a la naturaleza proteica del protoplasma; la calidad del compost como fertilizante está directamente relacionada con su contenido de N.
Fósforo	Importante en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano.
Micronutrientes	Existen otros nutrientes presentes en menor cantidad. Tienen un papel importante en la síntesis de las enzimas, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte intra y extracelular (Miyatake & Iwabuchi, 2006).

Se ha comprobado que entre el inicio y el final del proceso de compostaje se produce un aumento de las concentraciones de los distintos nutrientes debido a la pérdida de materia orgánica de la masa a compostar (M. J. Díaz, Madejón, Cabrera, Jiménez, & De Bertoldi, 2004; Michel, Pecchia, Rigot, & Keener, 2004). Un compost terminado debe contar con un contenido de nutrientes ($N+P_2O_5+K_2O$) superior al 4% (Moral & Muro, 2008).

- ✓ **Materia orgánica:**

Es el principal factor para determinar la calidad agronómica del compost (Kiehl, 1985). Debe considerarse que: algunos compuestos procedentes de la materia orgánica son utilizados por los microorganismos para formar sus tejidos y otros son transformados en anhídrido carbónico y agua; y que, finalizado el proceso de compostaje, los nuevos materiales formados poseerán propiedades distintas a las de los

materiales originales, confiriéndole a la masa unas características físicas y químicas distintas (Haug et al., 1993).

Durante el proceso, la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada (Zucconi & De Bertoldi, 1987).

Cabe mencionar que, con un mayor contenido de materia orgánica en el producto final, los metales pesados presentes en el compost estén disponibles en menor medida (García, Pineda, Totosaus, & González-González, 2008).

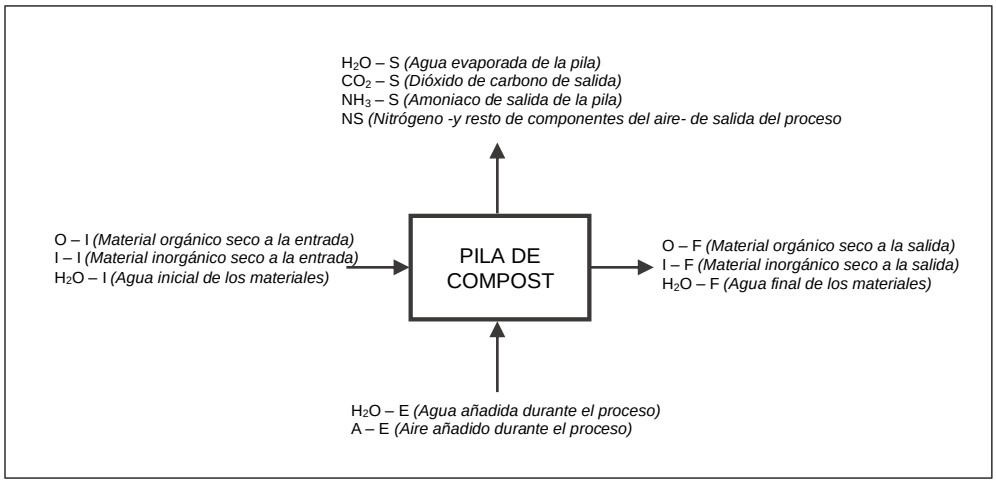


Figura 04: Representación esquemática del balance de materia en el compostaje.
Fuente: Bueno et al. (2008).

- ✓ **Conductividad eléctrica (CE):**

Está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones de amonio o nitrato formados durante el proceso (Sánchez-Monedero et al., 2001).

Por lo general la CE tiende a aumentar durante el proceso debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de nutrientes. Una hidratación excesiva de la masa (que deviene en la generación de lixiviados) puede provocar un descenso de la CE durante el proceso.

Valores elevados de CE en el compost terminado dificultan el manejo de la fertilización de los suelos y pueden ocasionar problemas de fitotoxicidad en el cultivo (Barbaro, Karlanian, & Mata, 2005).

c. Manejo del proceso de compostaje

- **Volteos**

Al inicio del proceso, la masa de desechos presenta poros de diferentes dimensiones y son dispersados de forma heterogénea, por consiguiente, el aire (procedente de aireación natural o forzada) pasa por las aperturas más grandes, pudiendo generarse condiciones anaeróbicas en zonas de la pila con alta densidad y poros pequeños, lo que impide la degradación aeróbica y ocasiona malos olores (Madrid et al., 2001).

Una suficiente circulación de aire se puede asegurar sólo si está garantizada una dispersión homogénea de los residuos en la masa. Es por ello que se necesita mover y mezclar los desechos con una determinada frecuencia. Dependiendo del tipo de plantas, la mezcla y volteo puede realizarse con la ayuda de cargadores o maquinaria específicamente diseñada para esa labor; como también de manera manual utilizando palas (FAO, 2013).

Un impacto positivo colateral de esta operación es que la temperatura es también homogeneizada dentro del cuerpo del material, lo que es importante para asegurar la correcta higienización del producto (Madrid et al., 2001).

- **Humedecimiento o riego**

Como ya se ha mencionado, la humedad es determinante para una degradación óptima de los materiales. Si la masa está demasiado seca el proceso de biodegradación se detiene.

Si la masa está humedecida en exceso, el proceso se torna anaeróbico (Cisterna, 2004).

El humedecimiento puede realizarse de manera manual o mecanizada. Influye también la zona geográfica en la que se emplaza una instalación de compostaje, pudiendo esta quedar al descubierto (si las lluvias son escasas y permiten un riego natural de las pilas) o techarse (si las lluvias son excesivas), lo que permitiría aprovechar esas aguas, almacenándolas para su posterior uso en el riego de las pilas (Mollinedo, 2009; Röben, 2002).

- **Encalado**

El uso de la cal en el compostaje evita la proliferación de moscas. A su vez se aplica para cuando el proceso sea estable y para mejorar el pH e incrementar los contenidos de calcio, magnesio o mejorar las relaciones de las bases (Osorno, 2012).

- **Manejo de lixiviados**

Producto de la fase oxidativa, y dependiendo del tipo de material a compostar y del humedecimiento de la pila, se tiene una alta generación de lixiviados (Losada, 2009), sin uso específico en muchos de los casos. Para procesos productivos poco tecnificados es necesario impermeabilizar el suelo de tal manera que se evite la infiltración y por consiguiente se pueda alterar el suelo. En muchos de los casos, la acumulación de lixiviados entre las pilas de compostaje genera malos olores y atrae moscas (Huerta, López, Soliva, & Zaloña, 2008).

Estos lixiviados deben ser colectados y evacuados hasta un pozo cuyas paredes han sido recubiertas, aunque en la práctica es frecuente encontrar pozos descubiertos.

Además, dependiendo de si el sistema de recolección de residuos es selectivo o no, podría atribuírsele el carácter tóxico de los lixiviados a los impropios mezclados con los residuos.

Si dentro de las plantas de compostaje los residuos son amontonados por algunos días antes de ser procesados se pueden originar lixiviados en cantidades elevadas y el material comienza a experimentar transformaciones no deseadas que dificultan el proceso (Huerta et al., 2008).

En algunos casos los lixiviados se recirculan hacia las pilas de compostaje, lo que podría no ser una práctica benéfica ya que estos aportan componentes que pueden elevar la conductividad eléctrica del compost.

La utilidad para este subproducto podría darse como solución nutricional, al contener concentraciones importantes de nutrientes para el suelo (N, P, K). La hidroponía puede ser un destino eficiente. Se pueden usar los lixiviados (previo análisis y caracterización) haciendo una mezcla en proporciones iguales con productos comerciales para cultivos hidropónicos (Losada, 2009).

- **Manejo de impurezas**

Durante el proceso de compostaje es necesario (para algunos materiales) realizar un cribado para eliminar parte de las impurezas o impropios de gran tamaño que puedan estar presentes en el material o para recuperar parte del material estructurante de la mezcla que se está compostando.

Si el material inicial contiene impropios conviene separarlos tanto como sea posible y cuanto antes mejor. De este modo se reducirá: la superficie que se ha de destinar a las posteriores etapas del proceso, el desgaste de equipos y/o instalaciones o, lo que es más importante, el riesgo de obtener un producto final con una

elevada concentración de contaminantes o de impurezas. Estos contaminantes o impurezas son, en su mayoría, materiales no biodegradables tales como el vidrio, metales, plásticos, residuos especiales (baterías o medicinas, por ejemplo), etc. Los impropios tienen el potencial de transferir contaminantes al compost, así como de dificultar los procesos de tratamiento.

Existen estudios que demuestran la relación entre los niveles de impropios y las características del modelo de recogida de los residuos sólidos (fracción orgánica), y a su vez la relación entre el nivel de impropios y la calidad del compost (Campos et al., 2017). Impurezas como plásticos de PVC, materiales de construcción, productos de higiene, baterías, residuos de agroquímicos, etc., son fuente de metales pesados que se van liberando durante el proceso de compostaje (Adriano, 1986; Cantanhede et al., 1993)

2.2.3.4. Calidad del compost

Ansorena et al. (2014) define calidad del compost como la capacidad o aptitud del compost para satisfacer las necesidades de las plantas, con mínimo impacto ambiental y sin riesgo para la salud pública (Ansorena et al., 2014). El mismo autor señala que la calidad del compost para un uso dado suele determinarse, entre otras, por las siguientes vías:

- Mediante experimentos de campo, en los que se mide la respuesta de las plantas en condiciones reales de cultivo a diferentes dosis de compost, en términos de producción de biomasa, crecimiento radicular, número de hojas o de flores, etc.

- Midiendo un conjunto de propiedades como las organolépticas (olor, color, tamaño de partícula, presencia de impropios) que pueden evaluarse sensorialmente; mientras que las propiedades físicas, químicas y biológicas (densidad, porosidad, aireación, pH, CE, nutrientes, metales pesados, contaminación bacteriológica) se determinan en laboratorio.

A su vez, determinar qué parámetros son los más adecuados dependerá del uso final que se le quiera dar al compost.

Estos parámetros pueden estar definidos en función de su representatividad y de su fácil interpretación a fin de facilitar el aprovechamiento de los residuos orgánicos (Mazzarino, 2012).

Considerando que el ciclo no se cierra si el compost no tiene la calidad necesaria, se infiere que el control, tanto del proceso de producción (compostaje) como del producto final (compost) se hacen necesarios para asegurar una óptima calidad y mínimos costes (Bueno et al., 2008).

a. Estabilidad y madurez del compost

El proceso de compostaje consiste en la descomposición biológica aerobia de la materia orgánica en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, seguida de una estabilización y maduración del producto (Iglesias Jiménez, 2003).

Dicho control, aplicado teniéndose en cuenta ciertos criterios científicos, permitiría, a escala industrial, obtener un producto de alto valor agro biológico; es así que resulta importante la calidad del compost, entendida en términos de estabilidad biológica y de "humificación" (Iglesias et al., 2008).

La estabilidad biológica se entiende como la tasa o grado de descomposición de la materia orgánica, que se puede expresar como una función de la actividad microbiológica y se determina por medidas respirométricas o por la liberación de calor como resultado de la actividad de los microorganismos (Iannotti, Pang, Toth, Elwell, & Keener, 1993). La estabilidad biológica permitirá evitar problemas en el sistema suelo-planta asociados a una rápida oxidación del material en el suelo. Un compost inestable puede producir incrementos de temperatura (cuando se usa como componente de sustrato, por ejemplo) y causar daños irreversibles en el sistema radicular de las plantas cultivadas en contenedor (Masaguer & Benito, 2008).

La humificación es el proceso de transformación química y biológica de la materia orgánica en humus. Una alta humificación del material permitirá incrementar la fertilidad natural de los suelos de cultivo (Iglesias et al., 2008).

El grado de madurez del compost puede definirse como la ausencia de fitotoxicidad en el producto final, producida por determinados compuestos orgánicos fitotóxicos (amoníaco, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos hidrosolubles, etc.) que se forman durante la fase bio-oxidativa del compostaje o por la presencia de altas concentraciones de metales pesados potencialmente fitotóxicos de algunos residuos y/o una alta concentración de sales solubles (Iglesias et al., 2008).

El mismo autor señala que un compost altamente humificado, cuya materia orgánica ha evolucionado durante un largo período de tiempo de maduración hacia formas más resistentes a la biodegradación (y que presenta numerosas similitudes a las propiedades de la materia orgánica humificada del suelo), es un compost altamente maduro, que implícitamente está biológicamente estabilizado y además carece de sustancias orgánicas fitotóxicas. Por tanto, el término madurez conceptualmente engloba el término estabilidad. Es decir, cuando se indica que un compost es inmaduro implícitamente se entiende que no está estabilizado biológicamente.

Madurez = estabilización biológica + "humificación".

El compost destinado a ser incorporado en el suelo debe mantener alta la materia orgánica. Sin embargo, es crucial que la materia orgánica sea estable y madura (Vázquez, Sen, & Soto, 2015). La evaluación de la madurez del compost ha sido reconocida como el más importante problema concerniente a su utilización agronómica, ya que la aplicación de un compost inmaduro a los suelos de cultivo es una de las causas más frecuentes de los fracasos observados en el rendimiento de los cultivos (Iglesias et al., 2008).

Los métodos planteados para la determinación de la madurez del compost están basados en el estudio de la evolución de determinados parámetros físico-químicos y bioquímicos a lo largo del proceso de compostaje y en la evaluación del producto.

En general, los métodos propuestos para la evaluación del grado de madurez del compost, según la naturaleza del parámetro que se evalúa, pueden ser (Iglesias et al., 2008):

- Parámetros sensoriales de la madurez (test o criterios de tipo físico).
- Evolución de parámetros de la biomasa microbiana.
- Estudios de la materia orgánica humificada.
- Indicadores químicos de madurez.
- Métodos biológicos (test de fitotoxicidad).
- Técnicas instrumentales avanzadas.

b. Fitotoxicidad como indicador de madurez

La fitotoxicidad es la condición o cualidad del compost que influye negativamente en el crecimiento vegetal. Puesto que todas las aplicaciones potenciales del compost contemplan el contacto con las plantas, la fitotoxicidad es uno de los criterios más importantes para evaluar su calidad y adecuación, tanto para fines agrícolas, como de restauración ambiental o paisajística, siendo de especial interés cuando el compost se destina a aplicaciones hortícolas de alto valor añadido (Iglesias et al., 2008). Este autor menciona que la toxicidad puede ser causada por diversos factores; algunos se originan durante el proceso de compostaje (amoníaco, ácidos orgánicos o óxido de etileno) en etapas intermedias de la transformación de la materia orgánica, o como consecuencia de una mala gestión del proceso, pero otros componentes tóxicos (sales, metales pesados, fenoles hidrosolubles) pueden deberse a los materiales que se compostan.

Durante el proceso de compostaje, la producción de estos compuestos fitotóxicos representa una situación transitoria, pues es elevada en el estadio inicial, en el que se produce una rápida degradación de la materia orgánica y disminuye en el de maduración, en el que predomina la humificación y mineralización. La estabilización parece ser más rápida al aumentar la disponibilidad de O_2, observándose que en los sistemas de aireación forzada la producción de compuestos fitotóxicos puede desaparecer en pocas semanas, antes de acabar la fase termófila. Por el contrario, si el suministro de O_2 es deficiente, pueden observarse niveles letales de fitotoxicidad que duran meses e incluso más de un año (Huerta et al., 2008; Iglesias et al., 2008).

La disminución de la toxicidad hacia el final del proceso de compostaje puede deberse a varios factores, fundamentalmente a la degradación metabólica de algunos compuestos orgánicos fitotóxicos, o a la incorporación de determinadas moléculas fitotóxicas a la fracción de ácidos húmicos (Zucconi et al., 1985).

Al tratarse de un compost inmaduro y de su descomposición en el suelo, la producción de compuestos fitotóxicos causa graves efectos en la fisiología de las plantas y en la germinación de las semillas. El efecto fitotóxico en las semillas y plantas está ocasionado fundamentalmente por la emisión de amoníaco, que es especialmente importante cuando se compostan sustratos con una baja relación C/N; al óxido de etileno, que es sintetizado durante la descomposición del compost en suelo (Wong, 1985); y ácidos orgánicos de bajo peso molecular, como el ácido acético (Devleeschauwer, Verdonk, & Van Assche, 1981), los ácidos propiónico y butírico (Chanyasak, Katayama, Hirai, Mori, & Kubota, 1983) y a fenoles (Albuquerque, González, García, & Cegarra, 2006).

La presencia de metales pesados en el compost y su aplicación puede perjudicar el crecimiento de las plantas, organismos del suelo y la salud humana y animal. El impacto sobre los cultivos dependerá no sólo de la concentración de los metales presentes sino también de las propiedades del suelo (pH, materia orgánica, CIC) (García et al., 2008).

Por otra parte, como la producción de compuestos fitotóxicos es muy dinámica y se ve claramente afectada por el estadio de compostaje, el tipo de proceso y la correcta gestión del mismo, los ensayos de fitotoxicidad ofrecen un parámetro útil para comparar distintos sistemas de compostaje (aerobios y anaerobios) y son idóneos para evitar riesgos ambientales.

La madurez del compost suele ser evaluada mediante ensayos de germinación, con especies sensibles a metabolitos fitotóxicos (Pierantozzi et al., 2012; Varnero et al., 2007).

c. Ensayos biológicos

Los ensayos o pruebas biológicas permiten evaluar el efecto combinado de las propiedades físicas y químicas sobre el crecimiento de las plantas, y se justifican especialmente por el empleo que habitualmente se le da al compost como enmienda de suelo, componente de sustratos de cultivo o fertilizante (Iglesias et al., 2008).

Estos ensayos deben ser simples, reproducibles y rápidos (Zucconi et al., 1985). La germinación de semillas y el crecimiento de plantas en condiciones in vitro son las técnicas más comunes para evaluar la fitotoxicidad del compost (Iglesias et al., 2008).

Es importante reconocer si las respuestas tóxicas se deben a las sustancias producidas en el proceso de compostaje (dando así una idea del grado de madurez del compost) o se deben a sales, metales pesados u otros contaminantes, introducidos con las materias primas, o incorporados al producto final (Warman, 1999).

Existen numerosos protocolos, que además emplean especies vegetales muy diversas (Emino & Warman, 2004), algunas de las cuales son más sensibles que otras a los diferentes compuestos tóxicos presentes en el compost.

- **Germinación y elongación de raíces**

  Zucconi et al. (1981), describieron un test de germinación con semillas de berro en contacto con extractos de compost, determinando la germinación y elongación relativas de raíces en comparación con las obtenidas en agua destilada. Desde entonces se han empleado ensayos de germinación basados en este test, pero introduciendo diversas modificaciones en cuanto a las especies vegetales empleadas y al modo de preparación de los extractos, que en el método original se extraían mediante presión a partir de compost humectado, y que otros autores obtienen por centrifugación y/o filtración a partir de suspensiones de diversas relaciones compost-agua. Estos extractos se emplean directamente en el ensayo o después de realizar diversas diluciones.

El efecto tóxico germinativo del compost, por medio de la aplicación de la metodología del índice de germinación (IG), se calcula teniendo como base el porcentaje de germinación relativa (PGR) y al crecimiento radicular relativo (CRR) de un determinado número de semillas en contacto con extractos acuosos de compost, con respecto a un control en agua destilada.

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

Donde:

IG: Índice de germinación.

PGR: Porcentaje de germinación relativa.

$$PGR = \frac{N° \ de \ semillas \ germinadas \ en \ el \ extracto}{N° \ de \ semillas \ germinadas \ en \ el \ testigo} * 100$$

CRR: Crecimiento radicular relativo.

$$CRR = \frac{Elongación \ radicular \ en \ el \ extracto}{Elongación \ radicular \ en \ el \ testigo} * 100$$

De acuerdo a Zucconi et al. (1981) y Emino & Warman (2004), valores de IG inferiores al 50% indican una alta fitotoxicidad del material; IG entre 50% y 80% indican fitotoxicidad moderada, concordando con Tiquia et al. (1996), que considera que el compost puede tener efectos de inhibición si se obtiene índices de germinación por debajo del 80%; mientras que cuando los valores son superiores al 80% se considera que el material no presenta fitotoxicidad.

En aquellos casos en los que IG supera el valor de 100%, el compost puede ser considerado como fitonutriente o fitoestimulante.

- **Siembra directa**

Estos ensayos se basan en la germinación de semillas depositadas directamente sobre un sustrato constituido por compost solo o mezclado con otros componentes, en comparación con un sustrato control, que puede ser un suelo de referencia (FCQAO, 1994), un sustrato comercial (Emino & Warman, 2004), una mezcla de turba y perlita (Iannotti, Grebus, Toth, Madden, & Hoitink, 1994; USDA & USCC, 2001) o una mezcla de un sustrato estándar y vermiculita (Standards Australia, 2012). La experiencia, que se lleva a cabo en condiciones controladas de luz y temperatura, puede durar entre 7 y 14 días. Al cabo de este tiempo se corta y pesa la parte aérea de las plantas calculándose la producción en términos relativos respecto al control.

Sobre la base de la norma austriaca ÖNORM S2023: Métodos de investigación y control de calidad del compost, el ensayo de siembra directa permite evaluar el desarrollo de las plantas en contacto con el compost, respecto del efecto tóxico y de la capacidad inhibidora que este último pueda presentar.

El retraso germinativo se calcula con la fórmula:

$$R_g = T_m - T_c$$

Donde:

R_g = Retraso germinativo (días).

T_m = Tiempo de germinación de la muestra (días).

T_c = Tiempo de germinación del control (días).

La biomasa generada se calcula con la fórmula:

$$B_m = \frac{100 * P_m}{P_c}$$

Donde:

B_m = Biomasa generada (% respecto al control).

P_m = Peso de la muestra (g).

P_c = Peso del control (g).

- **Cultivo de plantas**

Este tipo de ensayos se aproximan más a una prueba real de crecimiento, puesto que son experimentos de mayor duración (14-77 días), en los que se determina el peso fresco y/o seco de plantas cultivadas en macetas conteniendo mezclas de compost con suelo, turba o sustratos comerciales (Araújo & Monteiro, 2005; CCCME, 2005; FCQAO, 1994; Gariglio, Buyatti, Pilatti, Gonzalez Russia, & Acosta, 2002).

Los ensayos de cultivo en contenedor usan berro, pepino, trigo, cebada o rábano, especies que presentan diversa tolerancia a sales solubles y a otras sustancias orgánicas potencialmente tóxicas del compost (Iglesias et al., 2008). Estas pruebas son bastante complejas, porque permiten obtener datos de productividad; por otra parte, algunos autores consideran que el crecimiento de las plantas es más sensible frente a las sustancias tóxicas que la germinación de las semillas (Araújo & Monteiro, 2005; Cendón, Moldes, & Barral, 2005; Kapustka, 1997). El inconveniente es que los ensayos son más lentos y requieren de instalaciones con condiciones controladas de temperatura, humedad e iluminación, como cámaras de crecimiento o invernaderos (Iglesias et al., 2008).

Sobre la base del protocolo recomendado por la Federal Compost Quality Assurance Organization (FCQAO, 2002): Libro de métodos para el análisis del compost, se cuenta con el test de barley. Esta prueba permite evaluar la compatibilidad de las plantas en relación con su tolerancia al compost. Los resultados se evalúan mediante la fórmula siguiente:

$$FM_{(r)\ 25/50/75\%} = \left[\frac{FM_{(25/50/75\%)}}{FM_{EE0}}\right] * 100\%$$

Donde:

$FM_{(r)}$ = Rendimiento promedio de la mezcla con relación al control positivo *(para las mezclas al 25%, 50% y 75% de compost).*

FM = Rendimiento promedio de la masa fresca de la mezcla (g) *(para las mezclas al 25%, 50% y 75% de compost).*

FM_{EE0} = Rendimiento promedio de la masa fresca del suelo usado como control (g).

d. Evaluación de la calidad del compost

El suelo, como ente natural, no puede convertirse en un sumidero de residuos con capacidad de depuración infinita. Es un medio frágil y vulnerable, que se encuentra en equilibrio con unos factores formadores y, a través de su génesis, es el resultado de muchos años de evolución que puede verse alterado por una inadecuada utilización. Emplear productos orgánicos procedentes del compostaje sin un control y sin evaluación de su calidad puede conducir, en algunos casos, no sólo a no mejorar las propiedades del suelo, sino que puede comprometer el medio edáfico de manera irreversible.

Por tanto, una correcta utilización del compost y su consecuente valorización agrícola deben darse sin poner en riesgo el suelo ni el ambiente (Masaguer & Benito, 2008). La calidad del compost depende esencialmente del uso que se le vaya a dar a éste.

El concepto de calidad y su evaluación son importantes cuando el compost va a ser utilizado directamente, como sustrato de cultivo en semilleros o en contenedor (Butler, Sikora, Steinhilber, & Douglass, 2001). Así, cuando el compost va a ser aplicado al suelo, como enmienda orgánica o como mulch, la calidad exigida podría ser menor que en los casos anteriores.

Por ello, en términos generales, los requerimientos de calidad del compost deberían ir dirigidos a conseguir: aspecto y olor aceptables, correcta higienización; impurezas y contaminantes a nivel de trazas, nivel conocido de componentes agronómicamente útiles; y, características homogéneas y uniformes (Sullivan & Miller, 2001).

Tabla 11: Aspectos que afectan la calidad del compost.

El material inicial	El proceso de compostaje	El almacenaje del producto final
La calidad del material inicial en el compostaje determinará la calidad del material final. Así, materiales con altos contenidos en nutrientes o bajos valores en metales pesados, darán como resultados productos con altos niveles de nutrientes y sin problema en los contenidos en metales pesados.	Para conseguir una higienización del compost se requiere que el material haya pasado por temperaturas elevadas (> 60 °C) durante cierto tiempo, si esto no se cumple el producto final puede contener agentes patógenos o semillas de malas hierbas.	En ocasiones el proceso de compostaje continúa tras el almacenaje del producto, en este caso se deberán cuidar especialmente las condiciones de almacenaje. Las condiciones anaerobias además de generar malos olores, implican la formación de compuestos tóxicos (ácidos orgánicos, alcoholes, etc.) para los cultivos.

Fuente: Masaguer & Benito (2008).

Conocer el uso final del compost sirve para identificar los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar su calidad. Como referencia de lo antes mencionado se presenta la siguiente tabla:

Tabla 12: Parámetros para evaluar la calidad de un compost dependiendo del uso.

Parámetro de calidad	**Uso**			
	Sustrato para semillero	**Venta como sustrato**	**Enmienda o abono orgánico**	**Mulch**
Respuesta al crecimiento	++	++	++	-
Contenido en nutrientes	-	+	+	-
pH / Sales solubles	++	++	+	-
Color / Olor	++	++	+	+
Presencia de inertes	+	++	-	+
Maduración / estabilidad	++	++	+	-
Tamaño de partículas	++	+	+	+

Nota: (-) baja importancia; (+) moderada importancia; (++) alta importancia.

Tabla 13: Determinaciones que pueden ser utilizadas para valorar la calidad del compost.

Propiedad	Parámetro *Rango óptimo*	Informa sobre	Influye en
Propiedades físicas	Densidad aparente *400-700 kg/m^3*	Origen del material y tratamiento aplicado.	Transporte, manejo y aplicación
	Color *Marrón oscuro o negro*	Estabilidad	Aceptación
	Olor *Tierra mojada*	Estabilidad, funcionamiento del proceso	Aceptación, higiene e impacto ambiental
	Humedad *35-45%*	Control del proceso	Transporte y manejo, salud laboral, seguridad.
	Granulometría	Sistemas de cribado y afinado	Manejo, aceptación y efectos sobre suelo/sustrato, salud laboral
	Capacidad de retención de agua	---	Efectos sobre el suelo, sustrato y ahorro de agua
	Contaminantes inertes *≤ 3% de impurezas (tamaño superior a 2 mm)*	Materiales tratados, sistemas de separación y afinado	Aceptación, impacto ambiental y seguridad
Propiedades químicas	Contenido y estabilidad de la materia orgánica	Materiales iniciales, desarrollo y control del proceso, estabilidad	Efectos sobre el suelo/sustrato, sobre los vegetales y aceptación, posibles usos.
	Nutrientes minerales	Materiales iniciales, desarrollo y control del proceso	Efectos sobre el suelo/sustrato y sobre los vegetales, efectos sobre las dosis de fertilización.
	Contaminantes	Materiales iniciales	Salud, efectos sobre el suelo/sustrato y sobre los vegetales e impacto ambiental, afectación de la cadena trófica.
	Sales solubles (CE) *< 1,5 dS.m^{-1}*	Materiales iniciales, desarrollo y control del proceso, estabilidad	Efectos sobre el suelo/sustrato y sobre los vegetales, impacto ambiental, riegos durante el tratamiento
	pH *6,5 – 8,5*	Materiales iniciales, desarrollo y control del proceso	Disponibilidad de nutrientes, posibles usos, efectos sobre el suelo, agua y vegetales.
Propiedades biológicas	Patógenos	Desarrollo y control del proceso, estabilidad, higienización	Salud laboral; contaminación de suelos, aguas y vegetales; impacto ambiental.
	Semillas de malas hierbas	Origen de los materiales, desarrollo y control del proceso, estabilidad/higienización.	Efectos sobre el suelo/sustrato y sobre la producción
	Índice de germinación	Desarrollo y control del proceso, estabilidad.	Fitotoxicidad, posibles aplicaciones.
	Respirometría	Desarrollo y control del proceso, estabilidad.	Actividad biológica, posibles aplicaciones.

Fuente: Soliva & López (2004).

El destino final del compost influye también en su calidad, ya que cada aplicación o aprovechamiento tiene exigencias que son particulares. Es así que pueden establecerse distintas exigencias según el mercado al que vaya destinado, por ejemplo (Ligon & Garland, 1998).

Si bien la determinación del mayor número de parámetros (físicos, físico-químicos, químicos y biológicos) nos lleva a definir mejor la calidad del producto, se trata de seleccionar aquellos que mejor definan las características del compost en función del uso que se le dé al mismo. Por tanto, los criterios relevantes en la evaluación de la calidad son: destino del producto, protección del entorno y requerimientos del mercado (Soliva & López, 2004).

También debe controlarse el funcionamiento y los rendimientos de las plantas de compostaje, así como la adecuación de la maquinaria (Ligon & Garland, 1998). En la actualidad algunas plantas de compostaje no funcionan bien y otras se están construyendo por considerarse políticamente correcto, pero no por el real convencimiento y preocupación por conseguir que sean rentables (ambiental y económicamente) (Huerta et al., 2008).

e. Normas sobre compostaje y calidad del compost

Ansorena et al. (2014), señala que los criterios legales están orientados a la comercialización del compost y, por tanto, al cumplimiento de unos requisitos mínimos establecidos para determinados parámetros del compost comercial obtenido en plantas industriales: porcentajes de impurezas, humedad, materia orgánica, metales pesados, carga bacteriológica, etc.

En ese sentido, Canadá cuenta con una norma elaborada por la Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Austria cuenta con el Reglamento austriaco de calidad de compost (Kompostverordnung, BGBL. I Nr.292/2001), la cual exige bajo contenido de metales y otros contaminantes. A su vez establecen la calidad del compost de acuerdo al uso. Calidad A+, para uso en agricultura orgánica o en la agricultura en general; Calidad A, para uso en la agricultura en general y Calidad B, para no uso en agricultura (uso

en re cultivación de rellenos sanitarios, por ejemplo). Incluso, la norma austriaca se preocupa de que el compost produzca beneficios a los cultivos. Estados Unidos cuenta con la norma de la California Compost Quality Council (CCQC, 2001), la cual establece el índice de madurez del compost, en el que se recomienda, por ejemplo, que la relación C/N debe ser menor o igual a 25. Este índice establece la evaluación de la evolución de CO_2 (respirometría), demanda de oxígeno, y pruebas de autocalentamiento; relación A/N, concentración de amonio, concentración de ácidos orgánicos volátiles y pruebas (índice de germinación) en plantas. La norma danesa pretende proteger al suelo de una aplicación excesiva de nutrientes. España se ciñe en evitar la contaminación excesiva por metales.

En la región, México cuenta con la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-AMBT-2001, que establece los requerimientos mínimos para la producción de compost a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad del compost producido y/o distribuido en el distrito federal. Colombia tiene la Norma Técnica Colombiana (NTC 5167 - 2001): Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores del suelo. Chile cuenta con la Norma Chilena Oficial (NCh 2880.Of2004): Compost, clasificación y requisitos (Instituto Nacional de Normalización de la República de Chile), que, de acuerdo a su nivel de calidad, clasifica al compost de la siguiente manera:

Compost Clase A:	Producto de alto nivel de calidad que cumple con las exigencias establecidas en esta norma para el compost Clase A. Este producto no presenta restricciones de uso. De cumplir con todos los requisitos para esta clase, el compost puede ser utilizado en agricultura orgánica, esto además de cumplir con lo estipulado en la NCh2439- para materias primas.
Compost Clase B:	Producto de nivel intermedio de calidad que cumple con las exigencias establecidas en esta norma para el compost Clase B. Este producto puede presentar algunas restricciones de uso si su CE es $>$ 3 dS/m.

En el Perú no se cuentan con normas ni estándares de calidad para el compost.

2.2.3.5. Aplicaciones del compost

El compost puede usarse en diversas aplicaciones, que presentan diferentes niveles de exigencia de calidad, y que pueden agruparse de la siguiente manera (Ansorena et al., 2014; Moral & Muro, 2008):

a. Como sustrato o soporte de cultivos:

Es decir, los materiales distintos de los suelos, que permiten el crecimiento del sistema radicular de las plantas. Normalmente, los sustratos se emplean para el cultivo de plantas en macetas, jardineras o cualquier otro tipo de contenedor.

Pero en algunos sectores de la jardinería profesional, como los jardines públicos y los campos deportivos, se manifiesta una tendencia creciente a la sustitución del suelo natural por sustratos obtenidos a partir de mezclas de diversos materiales (tierra natural, arena, turba, compost, etc.).

El aspecto clave que condiciona el empleo del compost como componente de sustratos es su contenido en sales solubles, que se determina a través de la CE.

b. Como enmienda orgánica:

Materia orgánica procedente de materiales carbonados de origen vegetal o animal, utilizada fundamentalmente para mantener o aumentar el contenido orgánico del suelo, mejorar sus propiedades físicas y químicas al ser añadidas al suelo, liberando los nutrientes a largo plazo (Soliva, 2011).

Suelen resultar beneficiosas en todo tipo de texturas, desde suelos arenosos (incremento de la retención de agua y nutrientes) hasta arcillosos (aumento de la porosidad, aireación, permeabilidad, etc.).

Es utilizado especialmente en recuperación de espacios degradados, biorremediación, sellado de vertederos, etc.

c. Como abono orgánico:

Productos cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales proceden de materiales carbonados de origen animal o vegetal.

Pueden sustituir total o parcialmente a los fertilizantes minerales, aportando al mismo tiempo al suelo materia orgánica humificada que, como las enmiendas orgánicas, mejora sus propiedades físicas y biológicas (efecto supresor de enfermedades). Se utiliza en agricultura y jardinería.

d. Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades del suelo

Tabla 14: Efectos de la aplicación de compost sobre las propiedades del suelo.

Propiedades	Acción
Físicas	- Mejora la estructura y estabilidad del suelo (da soltura a los suelos pesados y compactos y cohesiona los suelos sueltos y arenosos) - Confiere un color oscuro al suelo (debido a la materia orgánica), ayudando a la retención de energía calorífica, lo que provoca un aumento moderado de la temperatura del suelo, que influye favorablemente en los procesos biológicos. - Incrementa la porosidad, facilitando el drenaje y también la aireación y respiración de las raíces. - Aumenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo, por lo que se aumenta la fertilidad de este. - Aumenta la capacidad de retención de agua de los suelos arenosos y la permeabilidad de los suelos arcillosos. - Reduce la erosión del suelo, favoreciendo el crecimiento radicular y la capacidad de retención de la humedad, lo cual, junto con la formación de agregados con las arcillas lo hace un buen agente preventivo de la desertización. - Mejora el laboreo al dar esponjosidad al terreno.
Químicas	- El compost aporta una gran ventaja por su comportamiento como fuente de nitrógeno de liberación lenta. - Incremento de los niveles de macro y micronutrientes esenciales. La liberación de estos nutrientes es gradual, lo que minimiza su lavado por las lluvias. - Aporta a las plantas sustancias necesarias para su metabolismo. La adición de compost puede aumentar los niveles de fósforo por acción directa, además de mejorar la capacidad de absorción y disponibilidad de P en el suelo. El K es un elemento muy móvil en el suelo, sin embargo, la fuente de K proporcionada por el compost puede ser una alternativa adecuada en circunstancias en las que puede producirse un exceso de lavado por lixiviación. En suelos ácidos, la falta de Ca y Mg puede constituir un serio problema, en estos casos, los aportes del compost, puede favorecer significativamente la nutrición cálcica y magnésica de los cultivos. - La adición de micronutrientes (FE, Mn, Cu, Zn, B, Mo) puede generar un aumento total de la masa de microorganismos y de la actividad enzimática, aportando una mejora general de la fertilidad del suelo. - Regula el pH. En suelos ácidos los compost maduros actúan elevando el pH, lo que mejora las condiciones microbiológicas y las condiciones de disponibilidad de nutrientes; en suelo neutros, los compost maduros contribuyen a la mejora del poder amortiguador del suelo. - Incremento de la capacidad tampón, lo que permite estabilizar la reacción del suelo. - Inactiva los residuos de plaguicidas debido a su capacidad de absorción y a su efecto sobre la capacidad de retención iónica y de amortiguación química.

Propiedades	Acción
	- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan a las plantas - Adiciona sustancias orgánicas como ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. - Aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo, a partir de los compuestos húmicos y de su interacción y adsorción con las arcillas, lo que las estabiliza y previene su degradación y descomposición a largo plazo, que es la base de la estructura de los agregados del suelo y la base de la retención y disponibilidad de los nutrientes del suelo.
Biológicas	- Favorece la coexistencia de diferentes especies de microorganismos, incrementa la microflora y la mesofauna como protozoos, rotíferos, nematodos y artrópodos, - Estimula el crecimiento vegetal, acelera el desarrollo radicular y los procesos fisiológicos de brotación, floración, madurez, sabor y color. Al mejorar el estado general de las plantas aumenta su resistencia al ataque de plagas y patógenos y la resistencia a las heladas. - Los ciclos de los nutrientes esenciales y de otros macro y micronutrientes se ven favorecidos a través de una adecuada mineralización de la materia orgánica, que asegura un continuo y gradual suministro de nutrientes a la solución del suelo, para ponerlos a disposición de la planta. - Transformación de nitrógeno soluble en nitrógeno orgánico (en el cuerpo de microorganismos) evitando su pérdida por lixiviación o como amoníaco en el aire. - Efecto sobre las comunidades microbianas. En tratamientos de biorremediación y recuperación de suelos es posible ejercer cierto grado de control sobre el desarrollo de comunidades microbianas específicas proveídas por el compost adicionado. - Efectos sobre la actividad metabólica microbiana, los microorganismos ejercen una alta acción biotransformadora en el suelo a través de enzimas que llevan a cabo una extensa gama de reacciones que permiten: poner a disposición de las plantas gran parte de los nutrientes que éstas requieren para su desarrollo; mantener la funcionalidad del suelo y restablecer las propiedades en aquellos suelos que han sufrido algún tipo de alteración. La adición de compost al suelo ejerce un efecto positivo sobre la actividad enzimática de origen microbiano.

Fuente: Aubert (1998), Binner et al. (2016), Ingelmo & Rubio (2008), Mollinedo(2009), Puerta (Puerta Echeverri, 2004), Vargas & Suárez (2008).

e. Aplicaciones en agricultura

Justamente, el uso de los abonos orgánicos apunta a mantener y mejorar la disponibilidad de nutrimentos en el suelo y obtener mayores rendimientos en la agricultura. Es así que estos deben considerarse como la mejor opción para la sostenibilidad del recurso suelo; su uso ha permitido aumentar la producción y la obtención de productos agrícolas orgánicos, que constituyen alimentos de alta calidad nutritiva sin el uso de insumos de síntesis comercial (Santos, 2015). En la siguiente tabla se señala el uso que se le puede dar al compost en la agricultura, teniendo en cuenta la calidad, cantidad, frecuencia y formas de aplicación:

Tabla 15: Usos del compost en la agricultura.

Aplicación	Objetivo	Cantidad necesaria (Kg/m^2)	Frecuencia de aplicación	Forma de aplicación
Preparación del terreno	Mejorar la calidad del suelo	< a 15	Una vez	Mezcla del compost con el suelo profundamente
Cultivo de papas, zanahoria y legumbres	Enriquecer el suelo	3 – 5	1 vez cada 2 años	Mezcla superficial del compost con el suelo
Trigo, avena, cebada, centeno y maíz	Enriquecer el suelo	2 - 6	1 vez cada 2 años	Mezcla superficial del compost con el suelo
Pastos, praderas	Enriquecer el suelo	3 - 6	1 vez cada 2 años	Dispersar sobre la superficie

Fuente: Fuentes (2000).

El compost maduro es un material fácilmente disgregable. Una vez aplicado al cultivo, las comunidades microbianas continúan su degradación mediante un proceso de mineralización que podrá ser más o menos rápida en función del clima de la zona. En zonas templadas este proceso tiene lugar de forma muy lenta, por lo que los beneficios de dicha aplicación podrían observarse varios años después de la misma. En este caso, una fracción importante de materia orgánica se estabilizaría finalmente y pasaría a formar parte del humus del suelo (Vargas & Suárez, 2008). Por otro lado, en zonas más cálidas y húmedas, aunque no excesivamente lluviosas, la tasa

de mineralización se incrementa de forma notable, llegando incluso a desaparecer el compost como tal y permaneciendo solo los nutrientes minerales. Como resultado de esto, en algunos climas tropicales podría ser necesario realizar varias aplicaciones de compost al año hasta obtener beneficios reales sobre los cultivos (Dick & McCoy, 1993).

Estudios recientes han demostrado que la adición de compost maduro procedente de residuos sólidos urbanos provoca un efecto positivo moderado sobre la concentración de nutrientes en cosechas de maíz, así como la producción de grano, siendo estos datos semejantes a los obtenidos con otros fertilizantes nitrogenados recomendados comercialmente (Wolkowski, 2003).

Estudios realizados por Badr El-Din et al. (2000) sobre plantas de tomate han confirmado que la aplicación de compost procedente de restos vegetales posee numerosas ventajas en relación a lo observado cuando se aplican fertilizantes inorgánicos o incluso otros fertilizantes orgánicos de origen animal, tal como se puede apreciar en el siguiente cuadro:

Tabla 16: Efectos de la aplicación de diferentes tipos de fertilizantes sobre el desarrollo vegetal.

Tratamiento	Peso seco	N asimilado	P asimilado	Peso fruto	*N° frutos/planta*	Producción
	g/planta	*mg/planta*	*mg/planta*	*Kg/planta*		*(t/ha)*
NPK – fertilizante mineral	46.6	1.025	107	5.8	35	80
Gallinaza	48.5	1.042	107	5.9	34	82.7
Compost	**54.8**	**1.216**	**121**	**6.8**	**40**	**95.8**

Fuente: Adaptado de Badr El-Din, et al. (2004).

Por otro lado, la aplicación de un compost de baja calidad y/o en cantidad excesiva puede originar, entre otras consecuencias que afectan negativamente al desarrollo vegetal (Ansorena et al., 2014):

- Asfixia radicular, provocada por una excesiva retención de agua.
- Carencia de nutrientes (como la inmovilización del nitrógeno), por una falta de madurez del compost.

- Efecto de deshidratación, provocado por un elevado contenido de sales solubles.

- Crecimiento de semillas y propágulos de malas hierbas, por una higienización incompleta del compost.

f. Aplicaciones alternativas

Conviene diversificar, en la medida de lo posible, las salidas del compost, ampliándolas a otros usos diferentes de los sustratos, enmiendas y/o abonos, que sean menos exigentes en términos de olores, estabilidad, granulometría, y propiedades fisicoquímicas (Ansorena et al., 2014).

El empleo de compost como mulch o como componente de enmiendas en restauración paisajística se presenta como una alternativa que permite aumentar los rendimientos de las plantas de compostaje, al utilizar directamente compost con mayor granulometría, menor madurez, mayor salinidad, etc.

Durante el desarrollo de obras de construcción de redes viarias, es necesario proceder a la restauración de vertederos y taludes. En su mayoría estos terrenos no poseen capa de suelo o, en caso de tenerlo, son de muy baja calidad, por la presencia de piedras y material arcilloso sin estructura y carente de materia orgánica humificada. En consecuencia, la aportación simultánea de sustancias húmicas y nutrientes minerales al suelo mediante la aplicación de compost presenta un elevado potencial de mejora de las condiciones de crecimiento vegetal, tanto para la siembre de especies cespitosas como para la plantación de especies arbóreas (Ansorena et al., 2014). La aplicación del compost permitirá reducir las pérdidas por erosión de suelo (que acabo siendo transportado hasta cuerpos de agua en donde se acumulan los sedimentos que bien podrían contener nutrientes minerales o contaminantes tóxicos, amenazando la salud de organismos acuáticos y comprometiendo los valores comerciales, recreativos y estéticos de los recursos hídricos) y la subsecuente desestabilización de taludes (WRAP, 2011).

Los procesos de remediación de suelos contaminados con elementos traza se basan principalmente en técnicas de extracción o estabilización de dichos contaminantes. Mientras que las primeras implican un coste elevado y en general la degradación de los suelos, las técnicas de estabilización pueden mejorar las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, no generan residuos y resultan más económicas (Mench et al., 2003). En este sentido, existen técnicas de remediación basadas en el uso de enmiendas que aceleran los procesos que ocurren de forma natural en el suelo para reducir la movilidad y la biodisponibilidad de elementos traza (biosorción, precipitación y complejación). Estos procesos naturales podrían no ser suficientes para eliminar los riesgos derivados de la presencia de elementos traza en suelos, por lo que la remediación natural asistida podría potenciar la actividad microbiana, la colonización y el desarrollo vegetal y así restaurar el ciclo de los nutrientes en suelos afectados (Vargas & Suárez, 2008), además de evitar que dichos elementos sean transferidos a la cadena alimentaria. Madejón et al. (2006) desarrolló investigaciones acerca de lo antes mencionado, observando también que la “vegetación salvaje” en estos escenarios parece estar implicada en procesos de fitoestabilización de suelos, ya que pudo modificar los hábitats contaminados y los hizo más accesibles para otras comunidades vegetales, a la vez que facilitó la restauración de la estructura y fertilidad de suelos.

El empleo de enmiendas orgánicas para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo pueden contribuir al control de enfermedades provocadas por patógenos vegetales que habitan en el suelo (Nico, 2002). El compost muestra estos beneficios, en términos de favorecer la supresión de patógenos vegetales del suelo, tal es el caso de *Pythium*, *Phytophthora spp*., entre otros (Hoitink, Stone, & Han, 1997; Vargas & Suárez, 2008).

Efectivamente, han sido demostrados fenómenos de supresividad de determinadas enfermedades, en los que la microbiota que permanece en el producto final, está directamente implicada.

Los principales mecanismos biológicos implicados en el efecto supresivo de las cepas microbianas antagonistas presentes en el

compost son la competición por la disponibilidad de nutrientes o espacio, la producción de sustancias antibióticas, hiperparasitismo, inducción de genes de resistencia en plantas (Hoitink & Boehm, 1999), producción de compuestos volátiles estimuladores o tóxicos a partir del compost y cambios en las propiedades físicas del sustrato o del suelo (Coventry, Noble, Mead, & Whipps, 2002). Es necesario mencionar que los composts deben estar adecuadamente estabilizados (para evitar fitotoxicidad) y deben ser colonizados por la microflora específica apropiada, para alcanzar el nivel de descomposición donde el control biológico es factible (Hoitink et al., 1997).

2.2.4. El trigo como indicador

El trigo es una planta monocotiledónea perteneciente a la familia de las gramíneas. Tiene raíces fasciculadas, su mayor o menor desarrollo es función de variables como la textura del terreno, la disponibilidad de agua y de oxígeno, etc. El 50% de las raíces está comprendido entre 0 y 25 cm de profundidad. Su tallo es hueco, sus hojas son cintiformes, paralelinervias y terminadas en punta. La espiga se forma en el brote terminal, apareciendo al término del desarrollo del tallo. Su ciclo vegetativo contempla 3 períodos: período vegetativo, que comprende desde la siembra hasta la terminación del espigado; período de reproducción, desde el encañado hasta la terminación del espigado; y período de maduración, que comprende desde el final del espigado hasta el momento de la recolección. En cuanto a las exigencias del cultivo, el trigo requiere de suelos con capacidad de retención, pero que, a la vez, tengan un buen drenaje (Guerrero, 1999).

El trigo tiene un pH del suelo óptimo entre 5.4 a 7 y su límite de tolerancia a la salinidad es de 6 dS/m, lo que lo hace moderadamente sensible (Maas & Hoffman, 1977).

A partir de este límite el cultivo manifiesta un comportamiento fenológico en las etapas de floración y maduración, mostrando un acortamiento de su ciclo en condiciones de salinidad (Argentel et al., 2008).

En medios con importantes contenidos de metales pesados, las plantas de trigo pueden absorberlos por las raíces y acumularlos en diferentes partes de estas (Díaz et al.,2001a). De acuerdo con la concentración de estos metales,

pueden ocasionar cambios en su metabolismo que repercuten en su crecimiento, en el proceso fotosintético y en la absorción y traslocación de nutrimentos a los diferentes órganos de las plantas provocando serias deficiencias (Díaz et al., 2001b).

2.3. Definición de términos

a. Aeróbico: Proceso que ocurre en presencia de oxígeno. Para que un compost funcione con éxito se debe proporcionar suficiente oxígeno para que mantenga el proceso aeróbico (FAO, 2013).

b. Anaeróbico: Proceso que ocurre en ausencia de oxígeno. Si esto ocurre durante el proceso de compostaje, éste se ralentiza y se pueden desprender malos olores, como consecuencia de procesos de pudrición (FAO, 2013).

c. Botadero: Acumulación inapropiada de residuos en vías y espacios públicos, así como en áreas urbanas, rurales o baldías que generan riesgos sanitarios o ambientales. Estas acumulaciones existen al margen de la Ley y carecen de autorización ("Decreto Legislativo No 1278", 2016).

d. Estabilidad: Está relacionada con la actividad biológica del compost y su transformación al ser aplicado al suelo.

e. Fenología: Observación de la evolución de los organismos en su ciclo vital, estudiando las vinculaciones existentes de dicha evolución biológica con la variación de las características ambientales (climáticas, edáficas, bióticas) (Quintero & Alonso, 2007).

f. Gestión integral de residuos: Toda actividad técnica administrativa de planificación, coordinación, concertación, diseño, aplicación y evaluación de políticas, estrategias, planes y programas de acción de manejo apropiado de los residuos sólidos ("Decreto Legislativo No 1278", 2016).

g. Humificación: Es el proceso de formación de ácidos húmicos y fúlvicos, a partir de la materia orgánica mineralizada (FAO, 2013).

h. Lábil: Soluble. Dicho de un compuesto inestable, que se transforma fácilmente en otro (DRAE, 2018).

i. **Lixiviado:** Líquido residual generado por la descomposición biológica de la materia orgánica o por la percolación del agua a través de los residuos durante el proceso de degradación (“Decreto Legislativo Nº 1278”, 2016).

j. **Mineralización:** Transformación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos y la liberación de formas inorgánicas esenciales para el desarrollo de las plantas (FAO, 2013).

k. **Mulch:** Acolchado, mantillo. Cubierta protectora del suelo. No es un fertilizante ni una enmienda, por lo que no debe mezclarse con el suelo.

l. **Reciclado:** Transformación de los residuos, dentro de un sistema de producción, para su fin inicial o para otros fines, incluido el compostaje y la biometanización, pero no la incineración con recuperación de energía (“Decreto Legislativo Nº 1278”, 2016).

m. **Relleno sanitario:** Instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos en los residuos municipales a superficie o bajo tierra, basados en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental (“Decreto Legislativo No 1278”, 2016).

n. **Reutilización:** Empleo de un producto usado para el mismo fin para el que fue diseñado.

o. **Supresividad:** Capacidad del compost para minimizar, e incluso, llegar a eliminar los daños producidos por enfermedades causadas por microorganismos patógenos.

p. **Valorización:** Cualquier operación cuyo objetivo sea que el residuo, uno o varios de los materiales que lo componen sea aprovechado y sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales o recursos en los procesos productivos. La valorización puede ser material o energética (“Decreto Legislativo No 1278”, 2016). Es todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios para el ambiente.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1. Diseño y caracterización de la muestra

3.1.1. Características generales del proceso de compostaje en la Planta de tratamiento de residuos sólidos municipales

3.1.1.1. Ubicación

La planta de tratamiento de residuos sólidos y relleno sanitario manual de la Municipalidad Provincial de Carhuaz se encuentra ubicada en el sector Pampamarca, centro poblado de Arhueypampa, distrito y provincia de Carhuaz, departamento de Ancash. Se accede por carretera afirmada desde la ciudad de Carhuaz, en una distancia de 3.2 km hacia el noreste. En el Anexo 1 se presenta el mapa de ubicación.

Tabla 17: Ubicación de la planta de tratamiento de residuos sólidos de la MPC.

COORDENADAS UTM WGS84		Altitud (msnm)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Este	Norte			
210448	8973946	2900	16.2	42

3.1.1.2. Descripción de la planta

Como parte de la observación y considerando el procedimiento para la descripción y estado de una planta de compostaje, sugerido por Huerta et al. (2008) y adaptado para nuestro contexto, se realizó el diagnóstico situacional de la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz. Se visitó la planta y, mediante entrevista con el responsable del lugar, se procedió al llenado de un formato (Anexo 2) en el que se recopilaron datos acerca del funcionamiento y del estado actual del sitio en mención. Como información complementaria, los hallazgos se comentan en el Capítulo IV de la presente investigación.

3.1.2. Población

La población estuvo constituida por el compost producido en la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz, 2017.

3.2. Técnicas e instrumentos de acopio de información

Las técnicas usadas para el acopio de información son la colecta de muestras, el control del proceso de compostaje, la caracterización del compost a nivel de laboratorio y las pruebas biológicas aplicadas.

3.2.1. Colecta de muestras

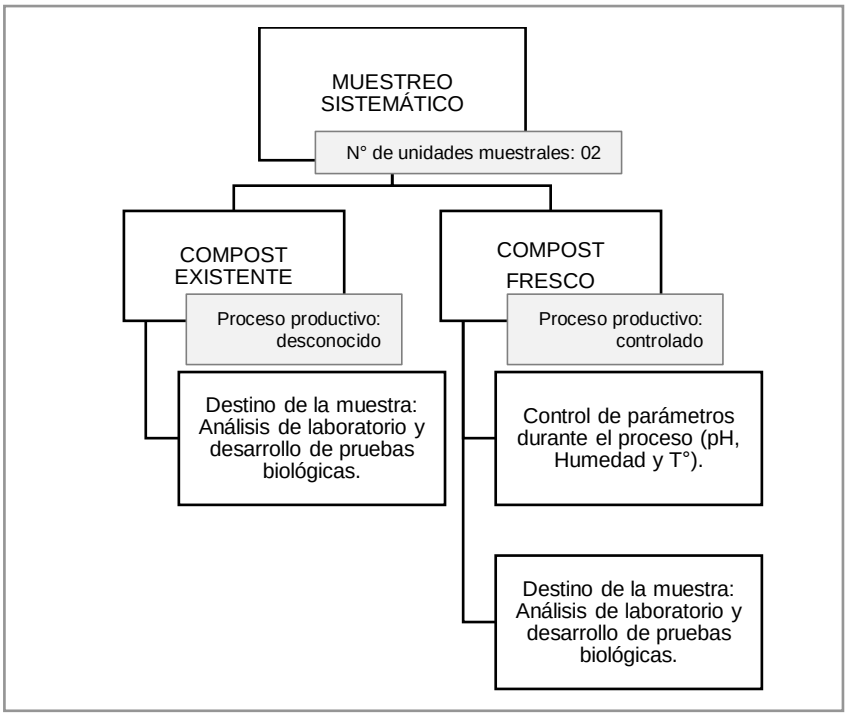


Figura 05: Esquema de muestreo.

Se realizaron dos muestreos durante un periodo de seis meses, la primera unidad muestral, de 200 kg, se obtuvo de la ruma de producto terminado, al que se le denominó compost existente.

La segunda unidad muestral, también de 200 kg, se denominó como compost fresco y se obtuvo de un conjunto de cuatro pilas de compostaje, las mismas que fueron controladas durante todo el proceso.

Tabla 18: Evaluaciones realizadas con cada unidad muestral.

Unidad muestral	Actividad	Fecha	Evaluado mediante
Compost existente	Primer Muestreo y proceso analítico	Oct-2017	- Análisis de laboratorio - Pruebas biológicas
Compost fresco	Armado de pilas	Nov-2017 Abr-2018	- Parámetros de control: Temperatura, humedad, pH, parámetros sensoriales de madurez
	Control del proceso		
	Segundo muestreo Proceso analítico	Abr-2018 Ago-2018	- Análisis de laboratorio - Pruebas biológicas

3.2.2. Control del proceso de compostaje

Según el diseño de la investigación y como parte de la caracterización del proceso productivo, se controlaron la temperatura, pH, humedad, y parámetros sensoriales de madurez (olor, color y presencia de impurezas); variables fundamentales en el proceso de compostaje, para lo cual se tomaron cuatro pilas (de las mismas que se obtuvo la segunda unidad muestral empleada en los análisis y pruebas biológicas - Figura 06).

Figura 06: Disposición de pilas de compostaje para su monitoreo.

Para asegurar una óptima calidad del compost es necesario controlar, tanto el proceso de producción (compostaje), como el producto final (compost) (Bueno et al., 2008). Por ello, las pilas fueron observadas durante todo el proceso de compostaje, el cual duró cinco meses; todo ello para complementar la información obtenida de los procesos analíticos.

3.2.2.1. Control de la temperatura

Para el control de la temperatura se procedió según Binner et al. (2016), empleando un termómetro digital, con el que se midieron los valores en 3 puntos de la pila de compostaje: central baja, central media y central superior; introduciendo el sensor de temperatura a unos 90 - 100 cm de profundidad en los lados de la pila. Los valores registrados están disponibles en el Anexo 3.

Esta variable se midió semanalmente durante todo el proceso de compostaje (19 semanas contadas a partir del establecimiento de las cuatro pilas de compostaje). Las mediciones se realizaron en horas de la mañana, con el propósito de evitar posibles distorsiones a causa de la radiación solar u otros factores.

3.2.2.2. Control de la humedad

La medición del contenido de humedad se realizó in situ con la ayuda del Soil Survey Instrument AMT-300. Los valores (Anexo 3) fueron registrados en el formato de campo respectivo.

3.2.2.3. Control del pH

La medición del pH se realizó durante cada volteo de pilas (cuatro volteos), con la ayuda del Soil Survey Instrument AMT-300, capaz de medir el pH en un rango de 3.5 a 9.

Figura 07: Esquema de puntos de control de temperatura en la pila de compostaje (Izquierda). Termómetro digital registrando valores de temperatura en la pila de compostaje (Derecha).

Figura 08: Medición del pH en la pila de compostaje.

3.2.2.4. Parámetros sensoriales de madurez

Para el control de los parámetros sensoriales de madurez (coloración, olor y presencia de impropios) se procedió del siguiente modo:

Considerando que el color final del compost depende principalmente del material inicial, pero también depende del sistema de compostaje empleado y hasta de la no homogenización del material durante el proceso (Masaguer & Benito, 2008); durante el control del proceso de compostaje se verificó, según Iglesias et al. (2008), que el compost presente un color pardo oscuro o casi negro, lo cual indicaba el grado de humificación del material .

La presencia de malos olores se determinó tomando en cuenta lo señalado por Iglesias et al. (2008) y por Iglesias & Pérez (1989), de que algunos olores son propios de cada fase térmica y responden a reacciones químicas específicas y de que el olor desagradable disminuye durante el compostaje hasta desaparecer, lo cual indica la madurez del producto. Al término del proceso, un compost con alto grado de madurez debe presentar un olor característico similar al de tierra húmeda, producido por la excreción de geosmina, metabolito secundario producido por actinomicetos mesófilos, microorganismos presentes durante la fase de maduración (Iglesias et al., 2008).

En cuanto al contenido de impropios, estos están constituidos por plásticos, vidrio, partículas metálicas, etc., y aparecen durante la etapa de tamizado. Su presencia se evaluó según lo señalado por Masaguer & Benito (2008), mediante tamizado entre 4 y 2 mm.

Figura 09: Impurezas halladas durante los ensayos biológicos.

3.2.3. Procedimiento para la colecta de sub-muestras de compost

Tal como se ha descrito, la investigación contempló la toma de dos unidades muestrales de compost, ambas de aproximadamente 200 kg (a). Siguiendo la técnica del cuarteo, de cada unidad muestral, luego de un proceso de mezclado, homogenización y cuarteo (b), se colectaron dos sub-muestras de compost (c) de aproximadamente 01 kg cada una, esto para ser empaquetadas en bolsas de plástico con cierre hermético y sobre-empaquetadas en cajas de tecnopor, siendo remitidas a los laboratorios (Figura 19).

El resto de ambas unidades muestrales fue almacenado, según recomiendan Masaguer & Benito (2008), en un área con condiciones apropiadas; esto es, ventilada y protegida de la lluvia, para luego ser empleada en el desarrollo de los ensayos biológicos.

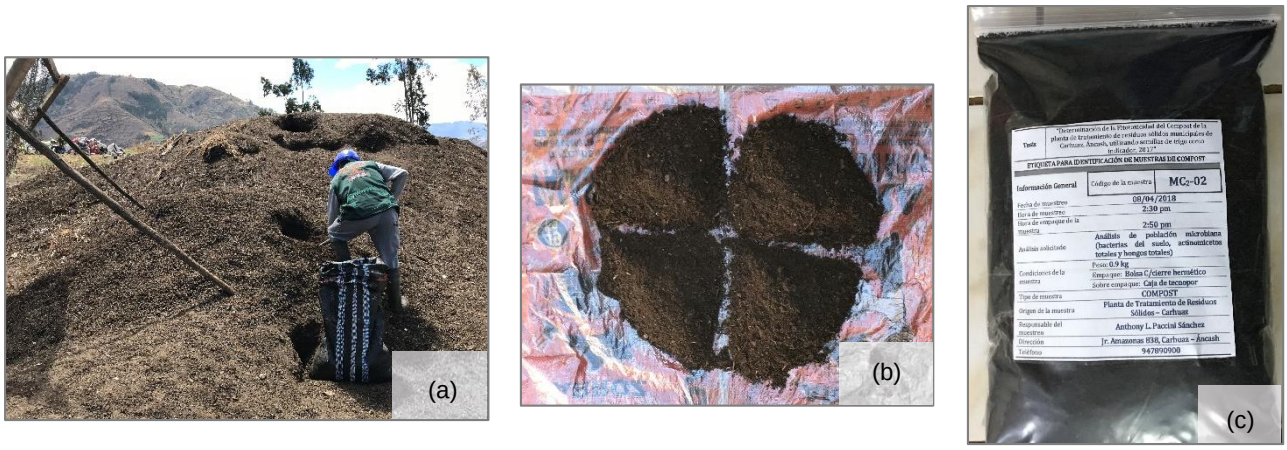


Figura 10: Secuencia para la colecta de sub-muestras de compost.

3.2.4. Procedimiento para la caracterización del compost

Para la caracterización del compost producido por la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz, sub-muestras de cada unidad muestral fueron remitidas al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes; y al laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso", de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en donde fueron analizadas según los parámetros descritos en la Figura 11 y cuyos resultados contribuyeron en la determinación de su grado de fitotoxicidad.

Variables físicas	Variables químicas	Variables microbiológicas
Densidad Humedad	pH Conductividad eléctrica Contenido de materia orgánica Contenido de Carbono Orgánico Contenido de nitrógeno Contenido de fósforo Contenido de potasio (K2O), calcio (CaO) y magnesio (MgO) Contenido de metales pesados	Coliformes totales Coliformes fecales

Figura 11: Variables y parámetros analizados para valorar la calidad del compost.

3.2.5. Procedimiento para la determinación del efecto tóxico germinativo del compost

El efecto tóxico germinativo de cada unidad muestral de compost obtenido de la planta de tratamiento de residuos sólidos de la Municipalidad Provincial de Carhuaz se evaluó mediante el índice de germinación (IG), conocido también como Test de Zucconi (Zucconi et al., 1981). Se preparó una dilución con relación 1/10 (10 gr de compost en 100 ml de agua destilada), la cual se agitó por 30 minutos y, luego de un proceso de filtrado, se almacenó en matraces. Posteriormente, en placas Petri de 9 cm de diámetro se colocó papel filtro, el cual fue humedecido con 10 ml de solución filtrada, para luego colocar 10 semillas de trigo (*Triticum spp)*. Se tapó y conservó por un periodo de 6 días. El tratamiento constó de cuatro repeticiones. Al séptimo día se evaluó la germinación y elongación relativa de las raíces de cada semilla, para ser comparado con un testigo preparado únicamente con agua destilada. Los datos obtenidos se registraron en un formato elaborado para tal fin y que permite realizar los cálculos para obtener el índice de germinación.

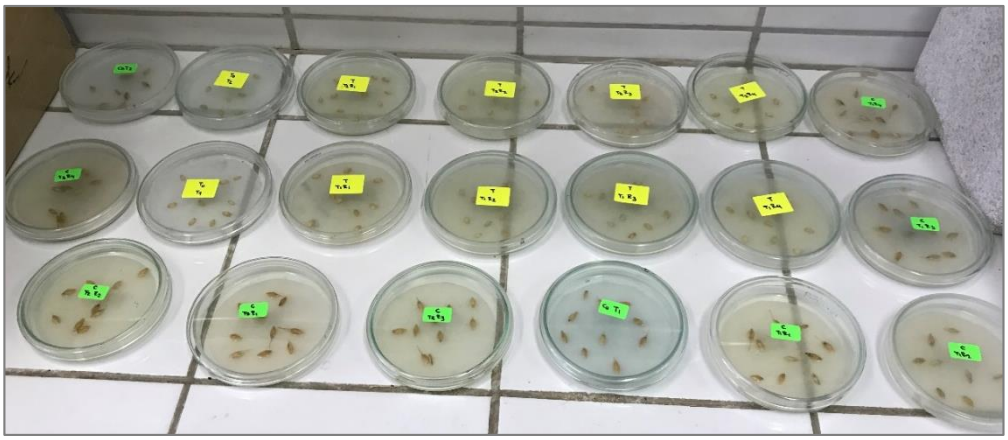


Figura 12: Test de Zucconi aplicado en semillas de trigo con tratamientos de compost antiguo (etiqueta amarilla) y compost fresco (etiqueta verde).

3.2.6. Procedimiento para determinar el efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa

3.2.6.1. Ensayo de siembre directa

Para este ensayo se requirieron recipientes con capacidad de 500 ml, en los que se colocó una capa base de 100 gr de grava (2 mm de diámetro aproximadamente), sobre la cual se colocaron 200 gr de una mezcla de arcilla, grava y compost al 0% (testigo), 15% y 30% en masa.

Posteriormente se colocaron 40 semillas de trigo y finalmente se recubrió con 100 gr de grava. El experimento se llevó a cabo en condiciones controladas de luz y temperatura, para esto los recipientes se colocaron, completamente al azar, en una cama germinadora en la que se controló un período de 16 horas de luz, 8 horas de sombra, hasta culminar los 14 días de evaluación. El riego de los recipientes, con agua corriente, fue diario. El ensayo se desarrolló en cuatro repeticiones para cada tratamiento.

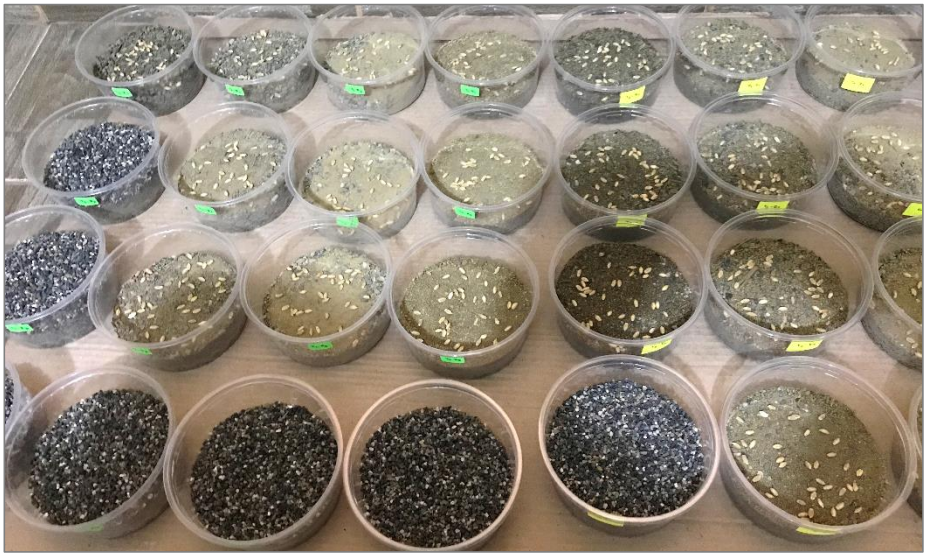


Figura 13: Siembra de semillas y distribución de los tratamientos al azar.

Registrado el tiempo de germinación y transcurrida la etapa de evaluación de cada tratamiento, la parte aérea de las plantas se cortó y pesó para calcularse la producción en términos de biomasa respecto al control o testigo, los datos fueron registrados en el formato correspondiente.

El presente ensayo se desarrolló con cada una de las unidades muestrales de compost (compost existente y compost fresco) que involucra la investigación.

3.2.6.2. Test de cultivo de plantas

Con base en los métodos para el análisis del compost (FCQAO, 2002), se formuló el test modificado de barley para determinar la compatibilidad de las plantas en relación con su tolerancia al compost. Para la prueba se utilizaron semillas de trigo y suelo estándar (analizado en términos de fertilidad, resultados disponibles en el Anexo 4) como control positivo.

Como sustratos se emplearon compost fresco y el mismo suelo estándar (previamente tamizados, diámetro menor a 10 mm), los que se mezclaron en distintas proporciones (tabla 19) para constituir los tratamientos que fueron evaluados.

Tabla 19: Proporciones de suelo - compost para la conformación de los tratamientos.

Sustrato	Proporción volumétrica (L)	
	Compost	Suelo
Control (100% suelo estándar)	0	3
Compost – suelo (50%-50%)	1.5	1.5
Compost – suelo (25%-75%)	1	2
Compost – suelo (75%-25%)	2	1

Para el desarrollo de este ensayo se construyó un invernadero de 12 m^2, cubierto con plástico (30% sombra), dentro del cual se colocaron al azar los maceteros en los que se armaron los tratamientos con las proporciones ya descritas, con la siembra de 40 semillas de trigo (*Triticum spp.*) en cada uno. La prueba se llevó a cabo con cuatro repeticiones y las mezclas fueron regadas periódicamente (Garcia C. et al., 2014).

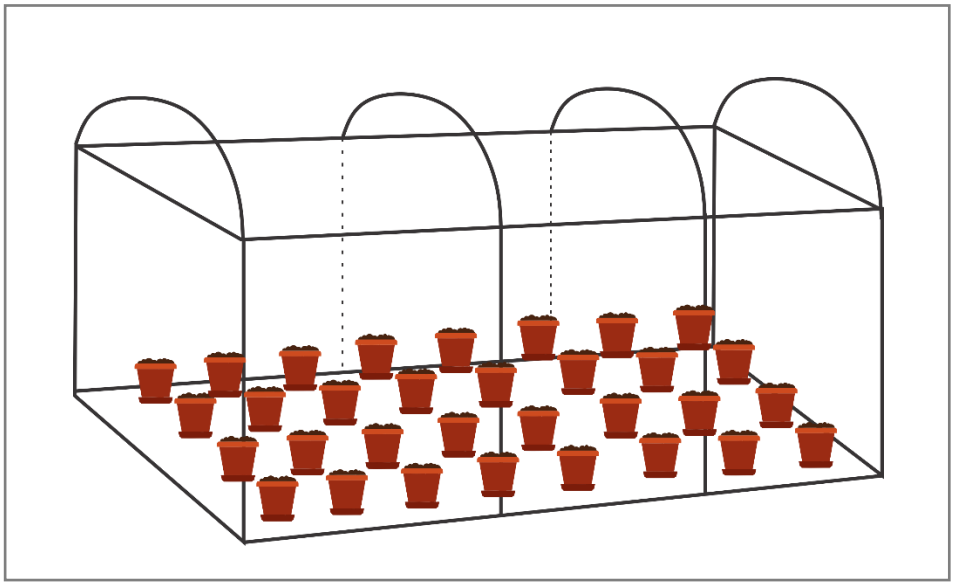


Figura 14: Esquema del ensayo de cultivo de plantas o Test modificado de barley.

El período de duración de la prueba fue de 82 días, cumplido este tiempo, se procedió a la evaluación del estado final de las plantas, lo que incluyó una inspección visual para detectar alguna sintomatología en su estructura, el conteo de individuos y la medición de la altura alcanzada. Posteriormente las plantas se extrajeron para determinar el peso fresco de la parte aérea utilizando una balanza analítica.

El presente ensayo se desarrolló para cada una de las unidades muestrales de compost (compost existente y compost fresco) que involucró la investigación.

3.3. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.3.1. Análisis del control del proceso de compostaje

La evaluación del compost durante el proceso de compostaje se realizó mediante el registro de valores de temperatura, humedad y pH, para poder comparar los datos con la referencia bibliográfica que señala los rangos óptimos para compost estables y maduros.

Tabla 20: Rangos óptimos de temperatura, humedad y pH durante el proceso de compostaje.

Proceso de compostaje	Rangos óptimos		
	Temperatura (°C)	Humedad (%)	pH
Fase mesófila	10-42	40-45	5
Fase termófila	45-70		8.5
Fase de enfriamiento	50-20		6.5 – 8.5
Fase de maduración	20	35-45	

Respecto de los parámetros sensoriales de madurez tomados en cuenta en la presente investigación:

- Para el contenido máximo de impropios, la legislación española (RD 824/2005) establece el 3% de contenido de impurezas de tamaño superior a 2 mm.

- En relación con el color del compost final, sabiéndose que éste depende del material inicial, del sistema de compostaje y de la homogenización del material durante el proceso, debe ser de un color marrón oscuro, casi negro.

- El olor del compost es una medida subjetiva y depende de diversos factores. Al término del proceso, el olor característico del producto debe ser similar al de la tierra húmeda.

3.3.2. Caracterización del compost

Los resultados de los análisis de laboratorio (Anexo 5) realizados a cada unidad muestral fueron comparados con la NCh 2880.Of2004: Compost – Clasificación y requisitos (detallada en el marco teórico, página 54).

3.3.3. Efecto tóxico germinativo del compost

La evaluación del efecto tóxico germinativo del compost se realizó mediante el cálculo del Índice de Germinación (descrito en el marco teórico, página 47), para luego comparar los resultados entre las unidades muestrales en términos de fitotoxicidad.

De acuerdo a Zucconi et al. (1985, 1981) y Emino & Warman (2004), valores de IG inferiores al 50% indican una alta fitotoxicidad del material; IG entre 50% y 80% indican fitotoxicidad moderada, concordando con Tiquia et al. (1996), que considera que el compost puede tener efectos de inhibición si se obtiene índices de germinación por debajo del 80%; mientras que cuando los valores son superiores al 80% se considera que el material no presenta fitotoxicidad.

En aquellos casos en los que IG supera el valor de 100%, el compost puede ser considerado como fitonutriente o fitoestimulante (Iglesias et al., 2008).

3.3.4. Efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa

3.3.4.1. Siembra directa

El análisis de datos obtenidos del ensayo de siembra directa se realizó teniendo como referencia lo establecido por la norma austriaca ÖNORM S2023: Métodos de investigación y control de calidad del compost (descrito en el marco teórico, página 48), evaluando el desarrollo de las plantas en contacto con el compost, respecto del efecto tóxico y de la capacidad inhibidora que este último pueda presentar. Se determinaron el retraso germinativo y la biomasa generada.

Según la norma citada, en el caso de la biomasa de las plantas frescas, el resultado se indica en %. En el caso de la duración de brote, el resultado se indica en días. Los valores promedios de las muestras tienen que compararse con los valores del control. Los resultados se dan en números enteros. Con la adición de compost al 15% y 30%, la producción en términos de biomasa debe ser ≥ 100%. Con la adición de un 45% de compost los sustratos pueden disminuirse a un valor de ≥ 90%. Con ningún tipo de relación de mezcla puede retrasarse el brote.

3.3.4.2. Test de cultivo de plantas

Para determinar la productividad y/o la sensibilidad de las plantas relacionada a su crecimiento en medio de sustancias tóxicas, se aplicó el test adaptado de barley, que involucra el cultivo en maceta de plantas en sustratos de diferentes proporciones volumétricas de suelo y compost, durante un periodo mayor de tiempo, de tal manera que la planta alcance un desarrollo suficiente para evaluar su sintomatología.

El análisis de datos obtenidos del ensayo de cultivo de plantas se desarrolló según lo establecido en el protocolo recomendado por la Federal Compost Quality Assurance Organization (FCQAO, 2002): Libro de métodos para el análisis del compost (descrito en el marco teórico, páginas 49 y 50).

Se evaluó:

- La germinación relativa (después de 7 días y al término de la prueba);
- El rendimiento promedio de la masa fresca. El tratamiento al 25% deberá alcanzar al menos el 90% del rendimiento de la masa fresca del sustrato usado como control, de cumplir estos requisitos, el compost usado se puede recomendar como mejorador de suelos;
- La altura alcanzada por las plantas al término de la prueba y, finalmente,
- La sintomatología de las plantas en relación con el efecto del compost usado y con su concentración en cada tratamiento.

3.4. Diagrama general del trabajo

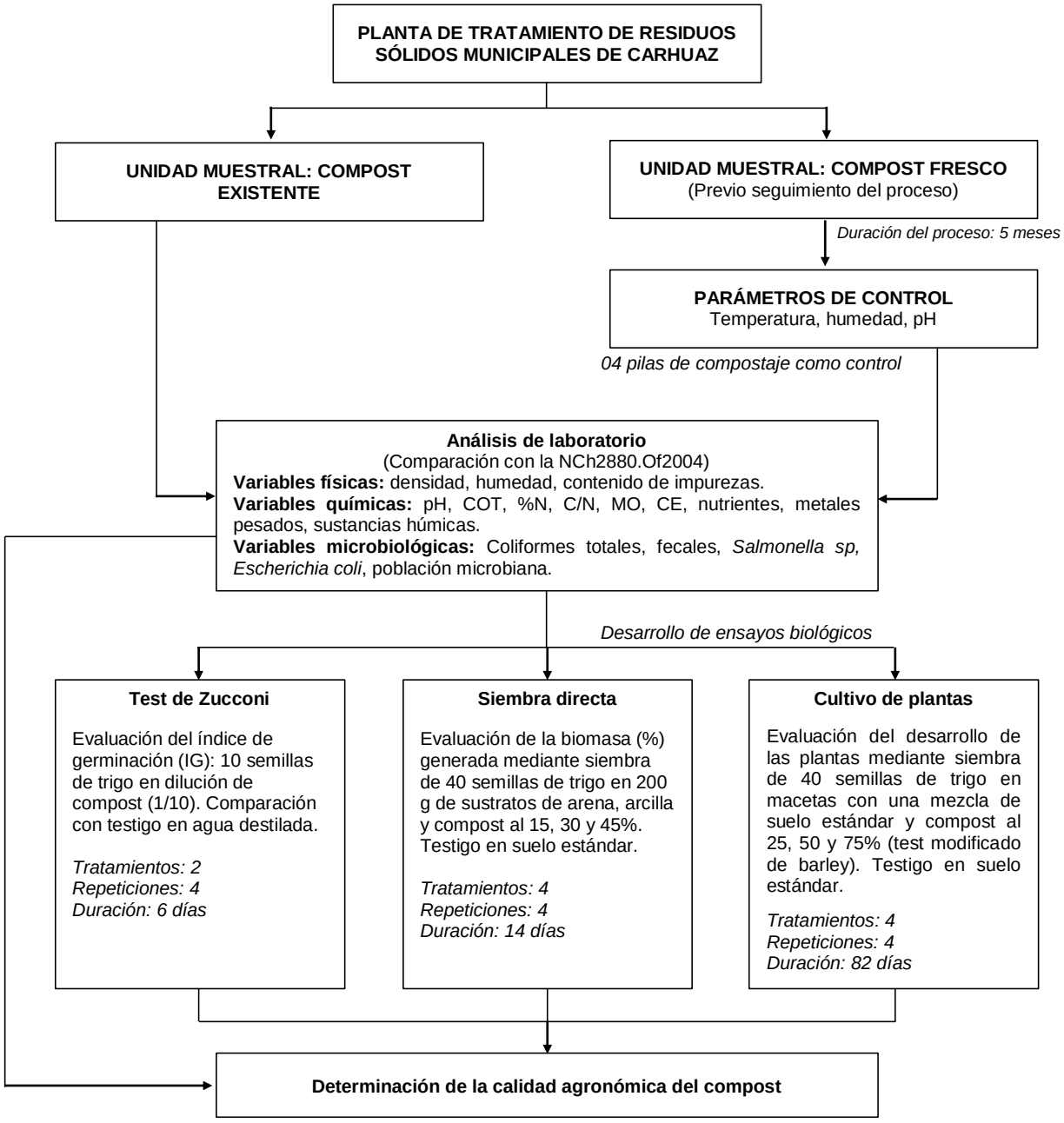


Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología.

Nota: Se aplicó el ANOVA para comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Descripción del funcionamiento y estado actual de la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz

La municipalidad provincial de Carhuaz, según su competencia, es responsable de la gestión y manejo de los residuos sólidos municipales (domiciliarios y no domiciliarios) en todo el ámbito urbano y parte del ámbito rural del distrito. Para ello cuenta con un sistema de recolección selectiva de residuos sólidos, mediante el cual los residuos son previamente segregados en la fuente de generación. Para tal fin se dispone de dos vehículos compactadores (8m^3 y 15 m^3) que recogen los residuos señalados. Dicha recolección ha sido programada tal como se muestra en la Tabla 21.

Los residuos son trasladados hasta la planta de tratamiento de residuos sólidos, la misma que ocupa un área aproximada de 1870 m^2 (incluye las áreas de segregación, compostaje, lombricultura y área de acopio del producto final).

En ella se trata la fracción orgánica de residuos sólidos municipales mediante el proceso de compostaje manual y los residuos sólidos inorgánicos, previamente segregados, se almacenan (según su tipo) para su posterior inserción al mercado del reciclaje local.

Se estima que al día se reciben alrededor de 21 t de residuos sólidos, 13 de las cuales corresponden a la fracción orgánica de residuos sólidos municipales.

Tabla 21: Programación regular de la recolección de residuos sólidos en el distrito de Carhuaz.

FUENTE DE GENERACIÓN		TIPO DE RESIDUO	DÍAS DE RECOLECCIÓN							DESTINO
			L	M	M	J	V	S	D	
Domiciliaria		Orgánicos	X		X		X			Compostaje
		Inorgánicos		X				X		Almacén de materiales reciclables
No domiciliaria		Orgánicos	X		X		X			Compostaje
		Inorgánicos		X				X		Almacén de materiales reciclables
Otras fuentes de generación	**Camal Municipal**	Orgánicos		X						Compostaje y/o lombricultura
	Mercado Municipal	Orgánicos			X				X	Compostaje
		Inorgánicos			X				X	Almacén de materiales reciclables
	Barrido de calles y espacios públicos	Inorgánicos	X	X	X	X	X	X	X	Relleno sanitario
	Áreas verdes*	Orgánicos								Compostaje

* Estos residuos son recogidos según su frecuencia de generación.

Fuente: Elaboración propia.

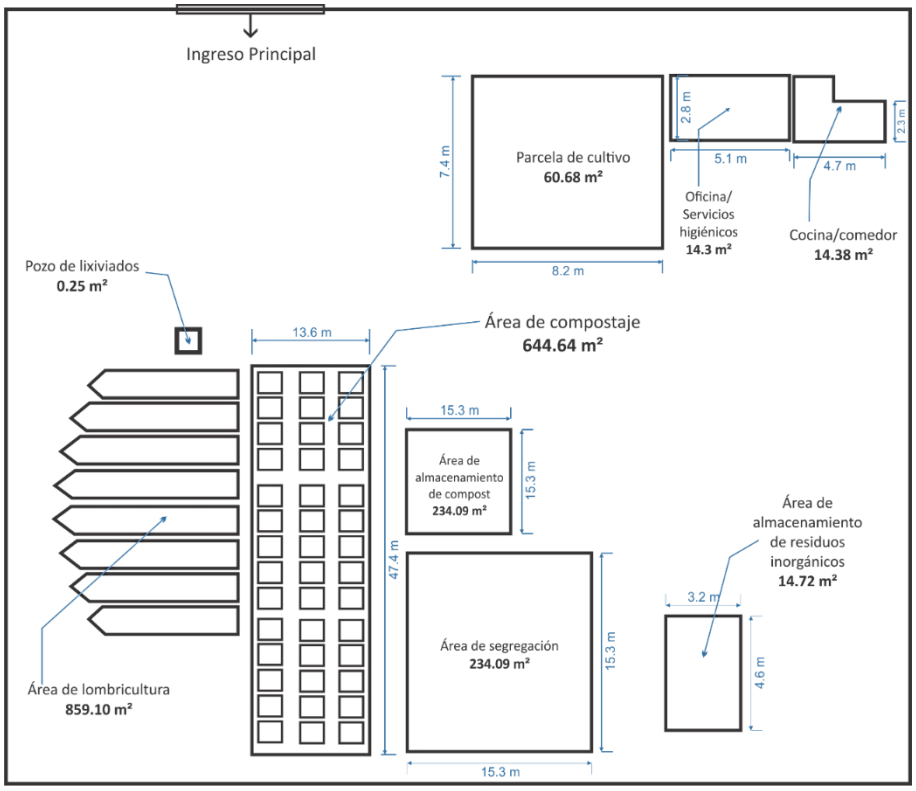


Figura 16: Distribución de la planta de tratamiento de residuos sólidos.

El tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos es a través del compostaje manual y se desarrolla de la siguiente manera:

- Los residuos orgánicos son descargados en el área de segregación y son nuevamente segregados (debido a que la separación en fuente no es óptima) para luego, con ayuda de carretillas, ser trasladados hasta el área de compostaje, en donde se amontonan en pilas de sección trapezoidal, a razón de 3.0 m de ancho, por 3.0 m de largo y 2 m de alto, aproximadamente. En este espacio pueden apilarse residuos hasta en 42 pilas de compostaje.

Figura 17: Distribución de las pilas durante el compostaje.

- Las pilas de compostaje son estructuradas por el personal obrero de la planta de tratamiento, según el siguiente orden: segregación, conformación de pilas, riego y volteo, tamizado y, finalmente, la cosecha. Para el armado de cada pila se requiere la acumulación de los residuos orgánicos (previamente segregados) recolectados en 3 días.

Figura 18: Segregación de residuos.

- Antes del armado de las pilas, se espolvorea cal (15-20 Kg) sobre los residuos orgánicos para evitar la proliferación de moscas. La cal se aplica una sola vez durante todo el proceso, debido a que, al momento de realizar los volteos, ésta se dispersa con el viento y daña los ojos del personal, según refieren los mismos.

- La etapa de descomposición de los residuos sólidos orgánicos dura alrededor de 4 meses, tiempo en el cual las pilas de compostaje son sometidas a riego cada 15-20 días (antes de realizar el volteo, con el fin de ablandarlas) y la frecuencia de volteo es de 20 a 22 días (esta actividad se efectúa con el propósito de mejorar las condiciones de oxigenación del medio). En algunos casos el volteo puede extenderse hasta por dos días. Tanto el riego como el volteo de pilas es manual, utilizándose para ello mangueras y picos. Cada obrero es responsable de atender su pila de compostaje.

Figura 19: Volteo manual de pilas de compostaje.

- Posteriormente se da inicio a la etapa de maduración, la cual dura aproximadamente 30 días. En este punto del proceso, el volumen de las pilas se ha reducido. Sus dimensiones son de, aproximadamente, 2.0 m de ancho, por 2.0 m de largo y 1.5 m de alto. Las pilas ya no se riegan y tampoco se voltean.

Figura 20: Pilas de compost en la etapa de maduración.

- El manejo de los lixiviados generados no es óptimo, se conducen por canales que no están recubiertos hasta un depósito abierto (que tampoco está recubierto), cuya capacidad de almacenamiento es sobrepasada en temporada de lluvias. Los lixiviados generados no son recirculados.

Figura 21: Estancamiento de lixiviados alrededor de las pilas.

- Terminado el proceso, el compost es tamizado (malla de 1''x 1'') para la separación de impurezas de forma manual. Las impurezas retiradas en su mayoría son restos plásticos, huesos, trozos de madera, piedras y tallos gruesos no degradados. Como destino final tienen el cerco perimétrico de las instalaciones de la planta, en donde se acumulan.

Figura 22: Tamizado del producto final.

- El sistema de producción de compost es por lotes, es decir, se aprovecha la materia prima disponible y el compost producido se va acumulando. De esta manera no se puede distinguir la antigüedad ni la calidad del total del producto almacenado en la planta.

- Se estima que al año se producen 30 toneladas de compost y su destino es generalmente para su uso en agricultura y jardinería. El compost se emplea por productores locales en aplicaciones a cultivos de palto, melocotón, lima, aguaymanto, rosas y tubérculos como la papa, así como mulch en parcelas experimentales de quenuales.

Del diagnóstico situacional se desprenden las siguientes observaciones:

- El área de compostaje no se encuentra techada, lo que puede significar un problema en temporada de lluvias.

- El manejo de los lixiviados generados durante el proceso de compostaje no es adecuado debido a que tanto los canales recolectores como el pozo no están recubiertos y se observan constantes obstrucciones, lo que deviene en la generación de malos olores y presencia de moscas.

- En cuanto a la generación de polvo, este se observa en las etapas de descomposición y maduración, pudiendo ser controlado a través del riego periódico de las pilas de compostaje, acción que permite además mantener los valores de humedad apropiados para garantizar los procesos biológicos.

- En relación con la generación de olores, estos se perciben mayormente en la etapa de descomposición, disminuyendo en la maduración y siendo casi imperceptibles en la etapa final del proceso.

- El proceso es enteramente manual, por lo tanto, no se involucra ningún tipo de maquinaria.

- La frecuencia de riego y volteo de pilas está programada de manera empírica, obviándose los criterios de control de parámetros de temperatura, humedad y aireación, que son determinantes para estas tareas durante el proceso de compostaje.

- El orden y limpieza de la planta se ha determinado como medio (en una escala de calificación de entre bajo, medio y alto).

4.2. Control del proceso de compostaje

4.2.1. Variación de la temperatura

El proceso de compostaje mostró una tendencia normal de la temperatura durante el proceso, tal como se aprecia en la Figura 23. Se pudo distinguir cada fase del proceso: mesófila, termófila y de enfriamiento.

Las pilas de compostaje se conformaron una tras otra en intervalos de una semana. En este período se registraron temperaturas en ascenso. Las pilas N° 02, 03 y 04 alcanzaron la fase termófila siete días después de haber sido conformadas, a diferencia de la pila N° 01 que en la cuarta semana registró valores dentro del rango termófilo.

El primer volteo se realizó a la séptima semana (21 días después de que las cuatro pilas estuvieron estructuradas). A partir de este momento todas las pilas de compostaje empezaron a mostrar un ascenso acelerado de temperatura, encontrándose el proceso en la fase termófila, con un promedio inicial de 53.50°C y un promedio final de 59.85°C.

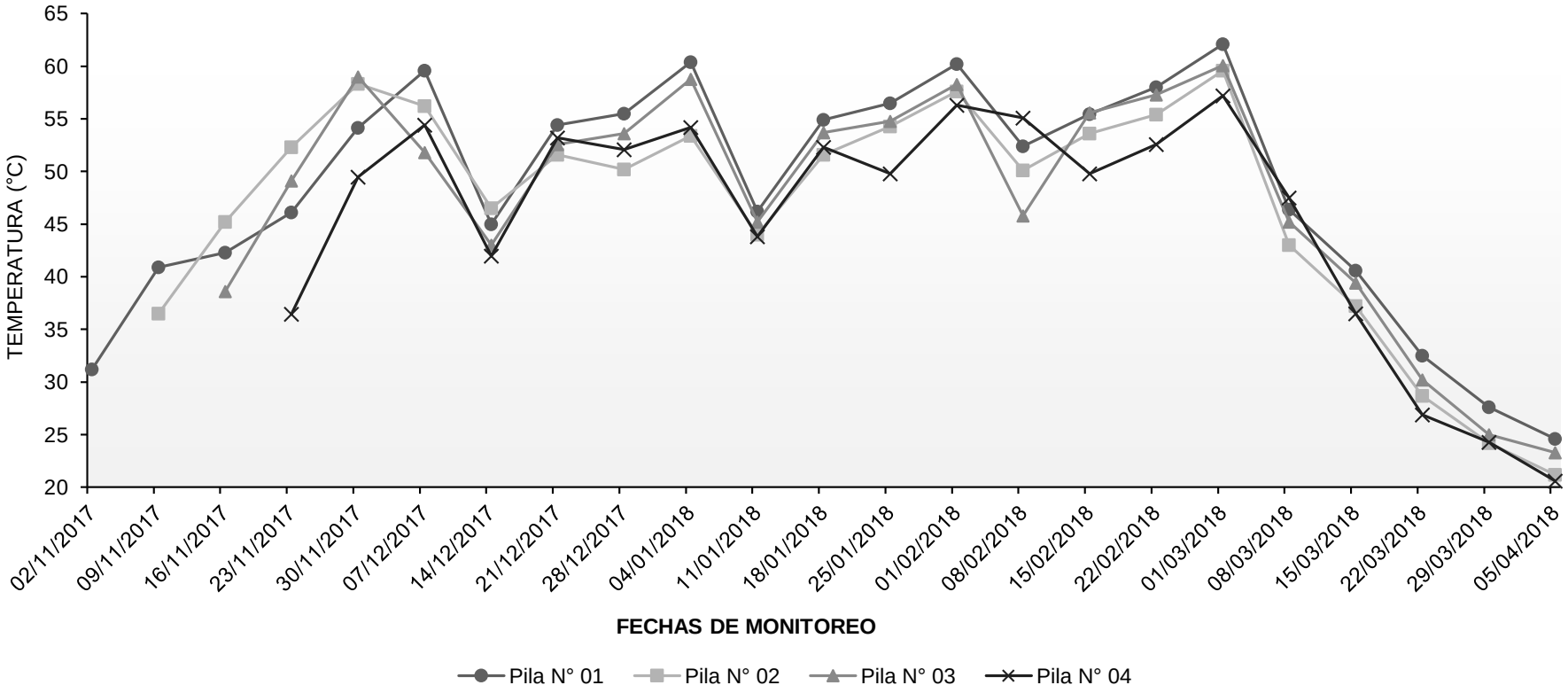


Figura 23: Variación de la temperatura de las pilas de compostaje durante su monitoreo.

La Figura N° 23 representa el comportamiento de la temperatura de las cuatro pilas de compostaje. La fase termófila se mantiene estable a lo largo del proceso, lo que demuestra que la frecuencia de volteos establecida por el personal responsable es apropiada, consiguiéndose que la pila de compostaje tengan una aireación apropiada, la temperatura de todo el cuerpo se regule y la humedad excesiva sea eliminada.

4.2.2. Variación de la humedad

Al inicio del proceso de compostaje, el contenido de humedad en todas las pilas se registró por encima del 65%, por lo cual las pilas no fueron regadas durante cuatro semanas. Posteriormente el riego se programó siete días antes de realizar cada volteo, con la finalidad de hacer que la pila se suelte y sea manejable.

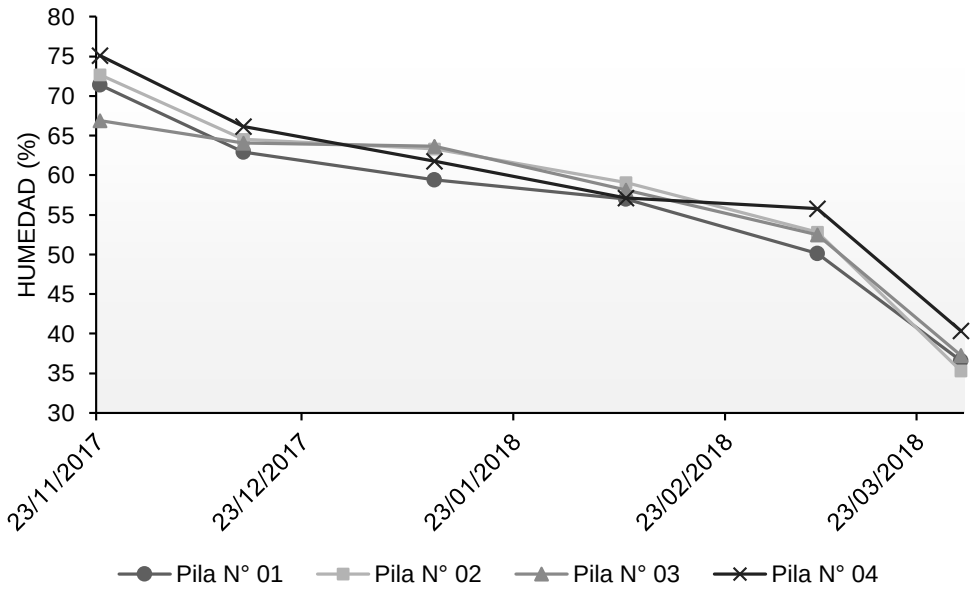


Figura 24: Variación de la humedad de las pilas de compostaje durante su monitoreo.

La humedad se mantuvo alrededor del 60% a lo largo del proceso, hasta el último volteo (08/03/2018), a partir de esta fecha el compost entró en fase de maduración, registrándose, en la última semana de monitoreo de este parámetro, un promedio de humedad de 37% (Figura 24).

Debe tenerse en cuenta que, durante esta investigación, el proceso de compostaje se desarrolló en temporada de lluvias, lo que puede haber influenciado en el contenido de agua en las pilas de compostaje. Sin embargo, al término del proceso los valores descendieron al punto de hallarse en el rango óptimo.

4.2.3. Variación del pH

La evolución del pH durante el monitoreo de las pilas de compostaje se presentó de la siguiente manera:

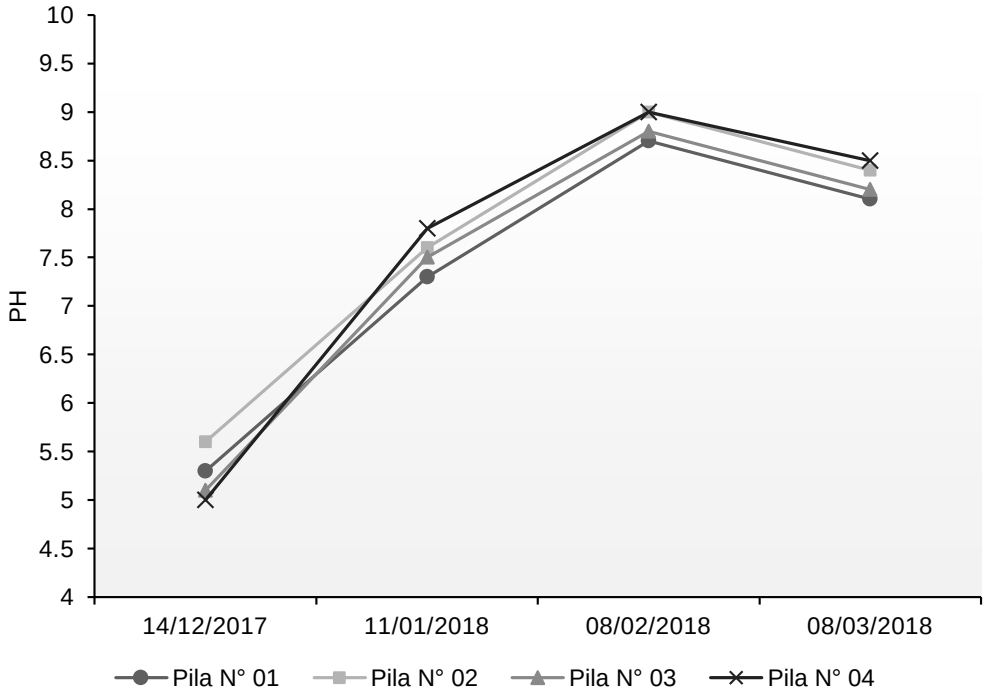


Figura 25: Variación del pH de las pilas de compostaje durante su monitoreo.

De la figura 25 se observa que, al comienzo del proceso, el pH descendió hasta valores promedio de 5.25. Posteriormente, el medio se fue alcalinizando de manera progresiva (durante la fase termófila), alcanzando valores en torno al 8.9 (registrados en el tercer monitoreo de las pilas de compostaje). Ya casi finalizado el proceso, se midió el pH por cuarta vez, encontrándose valores de pH de 8.3 en promedio, siendo evidente una disminución

4.2.4. Parámetros sensoriales de madurez

Durante el proceso de compostaje las pilas que inicialmente estuvieron conformadas por residuos orgánicos, experimentaron un oscurecimiento gradual en cuanto a su color, obteniéndose compost de color marrón oscuro, muy próximo a negro.

Al principio del proceso se pudo percibir la emanación de malos olores en todas las pilas de compostaje, esto debido a que los residuos orgánicos (provenientes de fuentes domiciliarias y no domiciliarias) que ingresan a las pilas contienen restos (comida, vegetales, etc.) en estado de descomposición. Esta situación además atrae la presencia de moscas. El control empleado por la Planta de Tratamiento fue el uso de una capa de cal sobre la pila.

A partir del primer volteo la intensidad del olor disminuyó. Pero a medida que se avanzaba en el tiempo los olores volvían a presentarse hasta la realización del siguiente volteo de pilas. A partir del cuarto volteo las pilas ya no emanaban malos olores.

En cuanto a la presencia de impurezas o impropios, estas se detectaron en los distintos niveles de esta investigación. El compost es tamizado en planta (tamiz de 1''x1''), lo cual resulta insuficiente. Se hallaron piezas metálicas (clavos, alambres), vidrio, bolsas y piezas de plástico, restos de medicamentos (fragmentos de frascos de ampollas, blíster de aluminio, entre otros) y RAEE (trozos de cables, piezas electrónicas y pilas usadas).

4.3. Caracterización del compost

Se realizó la comparación entre los resultados de los análisis hechos a las unidades muestrales de compost y los requisitos (concentraciones máximas, tolerancia y rangos de aceptación) estipulados en la Norma Chilena NCh 2880.Of2004: Compost - Clasificación y requisitos. Además, se emplearon otras normas (cuyos valores están detallados en los cuadros correspondientes) a fin de definir con mayor detalle la calidad del compost en evaluación.

4.3.1. Características físicas del compost bajo análisis

Los resultados de humedad, densidad aparente y contenido de impurezas de las unidades muestrales de compost, cuyos valores se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 22: Características físicas de las unidades muestrales de compost analizadas y su comparación con la norma.

	Humedad (%)		**Densidad aparente ($g.cc^{-1}$)**		**Impurezas (%)**	
Compost existente	20.13		0.66		53.87	
Compost fresco	34.25		0.55		48.56	
NCh 2880.Of2004	***Clase A***	***Clase B***	***Clase A***	***Clase B***	***Clase A***	***Clase B***
	30 - 45		*<0.700*		*≤5*	

El valor obtenido para humedad de la unidad muestral: Compost existente (Tabla 22) está por debajo del rango óptimo señalado por la norma. Durante la toma de muestra del compost existente, este se presentó pulverizado y seco, característica que evidenciaba su bajo nivel de humedad. En cuanto a la unidad muestral: Compost fresco, este compost presentó un valor de humedad apropiado, encontrándose dentro del rango óptimo señalado por la norma.

En relación con la densidad, ambas unidades muestrales están por debajo del valor máximo señalado por la norma.

El contenido de impurezas determinado en las unidades muestrales bajo análisis superó sobremanera tanto el límite determinado por la norma, como los valores aconsejados por la bibliografía al momento de evaluar la calidad del compost. Considerando que el compost se produce a partir de materiales residuales que no siempre están libres de elementos inertes, su calidad está influenciada tanto por la cantidad como por la composición de los impropios presentes. Durante el diagnóstico en planta se pudo comprobar que los residuos sólidos, una vez que son llevados a la planta de tratamiento, tienen que ser nuevamente segregados por el personal debido a la alta presencia de residuos inorgánicos (impurezas y materiales contaminantes incluidos) junto con los orgánicos.

4.3.2. Características químicas del compost bajo análisis

Para entender el aporte que el compost vaya a proporcionar a los suelos en su calidad de material estructurante y aportante de nutrientes, es importante conocer cómo se caracterizan químicamente. En la Tabla 23 se presentan los valores para pH, % de carbono, nitrógeno y la relación C/N.

Tabla 23: Caracterización química de las unidades muestrales de compost y su comparación con la norma.

	pH	%COT	%N	C/N
Compost existente	7.57	11.61	1.13	10.27
Compost fresco	7.91	16.54	1.51	10.95
NCh 2880.Of2004	***Clase A*** ***Clase B*** *5.0 - 8.5*	*N.D.*	***Clase A*** ***Clase B*** *≥ 0.5* *≥ 0.6*	***Clase A*** ***Clase B*** *≤ 25* *≤ 30*

Nota: N.D.: No determinado.

Se observa que los valores de pH para ambas unidades muestrales, aunque con una pequeña diferencia entre sí, están dentro del rango óptimo establecido por la norma.

En cuanto al contenido de COT en las muestras analizadas, asegura un aporte significativo de materia orgánica. La norma chilena no establece un valor mínimo requerido como referencia, sin embargo, en la ÖNORM S2200: Criterios de calidad para compost a partir de residuos biogénicos, se señala que el %COT debiera ser superior a 12%, tanto para compost del tipo A (para agricultura y para mezcla de sustratos) y del tipo B (para agricultura con alto contenido de sustancia orgánica que en el suelo seguirá degradándose).

El contenido de N total en ambas unidades muestrales de compost analizadas en esta investigación supera los valores mínimos requeridos por la norma chilena (≥ 0.5). Estos valores se encuentran dentro del intervalo que Nogales (1993) indica como habitual en compost de RSU (0.4 – 1.8%).

Respecto de la relación C/N, tanto el compost existente (10.27) como el compost fresco (10.95) no superan el valor límite establecido por la norma (≤ 25).

Tabla 24: Contenido de materia orgánica en las muestras de compost y su comparación con la norma.

	Materia Orgánica (MO) (%)	
Compost existente	24.16	
Compost fresco	33.41	
NCh 2880.Of2004	***Clase A***	***Clase B***
	≥ 20	*≥ 20*

El contenido de MO, según los resultados del estudio (Tabla 24), fue de 24.16% para el compost existente y 33.41%, los mismos que cumplen con lo requerido por la norma (≥ 20%).

Tabla 25: Valores de Conductividad eléctrica reportados para las unidades muestrales de compost y su comparación con la norma.

	Conductividad eléctrica – CE ($dS.m^{-1}$)	
Compost existente	8.44	
Compost fresco	9.58	
NCh 2880.Of2004	***Clase A***	***Clase B***
	< 3	*≤ 8*

Los valores obtenidos para conductividad eléctrica en ambas unidades muestrales superan el límite establecido por la norma chilena (Tabla 25). En contraste con el estándar austriaco para compost - ÖNORM S2200, que establece como límites < 2.0 $dS.m^{-1}$ para compost tipo A y < 4.0 $dS.m^{-1}$ para compost tipo B; los valores obtenidos los exceden ampliamente.

El valor nutritivo de los compost varía ampliamente, dependiendo de la naturaleza del material que se está compostando. A continuación (Tabla 26), se muestran los resultados del análisis hecho a las unidades muestrales de compost para esta investigación, los mismos que se comparan con los rangos de valores (muestra seca) determinados por Gotaas y la Organización Mundial de la Salud-OMS (1956), que generalmente se encuentran en los compost terminados.

Se debe considerar que son rangos bastante variables debido a la diversidad de materiales iniciales que, a su vez, han de producir composiciones químicas finales que varían ampliamente.

Tabla 26: Valores de nutrientes reportados para las unidades muestrales de compost.

	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	CaO (%)	MgO (%)
Compost existente	0.10	1.10	5.32	0.69
Compost fresco	1.51	2.46	6.78	0.87
Gotaas & OMS	***0.3 - 3.5***	***0.5 - 1.8***	***1.5 - 7.0***	***0.5 - 1.5***
FAO 1991	***0.1 - 1.6***	***0.4 - 1.6***	***1.1 - 6.0***	**-**

Salvo el contenido de K_2O para el compost fresco (2.46%, superior al rango sugerido), los contenidos de P, K, Ca y Mg (Tabla 28) están dentro del rango de valores para nutrientes en compost de RSU (Dalzell, 1991; Gotaas & WHO, 1956; Nogales, 1993). La presencia de CaO en el compost bajo análisis está dentro del rango sugerido.

Según los resultados para metales pesados (Tabla 27), el contenido de plomo (Pb), para ambas unidades muestrales, está por debajo del límite máximo establecido por la norma chilena. En relación con la norma austriaca, tanto el compost existente como el compost fresco estarían tipificados como de calidad A (uso en la agricultura en general), esto es, no podría usarse para agricultura orgánica.

El contenido de cadmio (Cd) para ambas unidades muestrales, supera el límite establecido por la norma chilena para la clase A, siendo considerado un compost de nivel intermedio de calidad. En relación con la norma austriaca, los valores de Cd superan los límites tanto para la calidad A+ como para la calidad A.

El contenido de cromo (Cr), para ambas unidades muestrales, está por debajo del límite establecido por la norma chilena y por la norma austriaca.

Tabla 27: Contenido de metales pesados en las unidades muestrales y límites propuestos en diferentes normas.

	Pb (ppm)		Cd (ppm)		Cr (ppm)	
Compost existente	64.5		2.13		24.13	
Compost fresco	50.44		3.34		22.54	
NCh 2880.Of2004	***Clase A***	***Clase B***	***Clase A***	***Clase B***	***Clase A***	***Clase B***
	< 100	***< 300***	***< 2***	***< 8***	***< 120***	***< 600***
BGBl. II 292-2001(*)	***Calidad A+***	***Calidad A***	***Calidad A+***	***Calidad A***	***Calidad A+***	***Calidad A***
	< 45	***< 120***	***< 0.7***	***< 1.0***	***< 70***	***< 70***

(*) BGBl. II 292-2001: Reglamento del Ministerio de Agricultura, Forestal, Ambiente y Recursos Hídricos de Austria sobre calidad de compostes de residuos sólidos orgánicos.

En la Tabla 28 se presentan los contenidos (%) de las sustancias húmicas en los compost analizados.

Tabla 28: Sustancias húmicas presentes en las unidades muestrales de compost.

	Ácido húmico (AH)	Ácido fúlvico (AF)	Huminas	Ratio AH/AF
Compost existente	3.35%	1.37%	15.30%	2.45
Compost fresco	3.94%	1.35%	23.23%	2.92

Las sustancias húmicas tienen importantes efectos estimulantes sobre las plantas en suelos con malas condiciones físicas que dificultan la producción de cultivos, reteniendo los nutrimentos por sus propiedades de intercambio catiónico y siendo fuente de N, P y S. Además, influyen en la movilidad de compuestos orgánicos no iónicos como pesticidas y contaminantes, removiéndolos de las soluciones acuosas (Popov, 2008).

4.3.3. Características microbiológicas del compost bajo análisis

El análisis de variables microbiológicas es importante para determinar la inocuidad del compost, siendo la densidad de coliformes fecales utilizada como un indicador de la presencia potencial de bacterias patógenas (EPA, 2003). En este contexto las muestras que contengan menos de 1000 NMP de coliformes fecales por gramo de compost en base seca indican que todos los microorganismos patógenos han sido destruidos.

Considerando lo planteado por Lyon (2000), que los organismos patógenos pueden sobrevivir hasta 60 días en el compost se realizó el análisis de las variables microbiológicas para el compost fresco, cuyos resultados se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29: Análisis microbiológico de la unidad muestral Compost Fresco

	Coliformes Totales NMP/g	**Coliformes fecales NMP/g**	***Salmonella sp***	***Escherichia coli* NMP/g**
Compost fresco	460	460	Ausencia	40
NCh 2880.Of2004	**-**	**< 1000**	**3 NMP/4g**	**-**

Según los resultados del análisis, tanto los coliformes fecales como la *Salmonella sp* se encuentran ausentes en la muestra de compost fresco.

En la presente investigación se determinó también la población microbiana presente en las unidades muestrales de compost analizadas, valores que se muestran en la tabla 30.

Tabla 30: Población microbiana presente en el compost bajo análisis

	Hongos UFC/g	**Actinomicetos UFC/g**
Compost existente	$197x10^3$	$83x10^4$
Compost fresco	$93x10^3$	$15x10^4$

4.4. Efecto tóxico germinativo del compost

4.4.1. Índice de germinación

El índice de germinación (IG) constituye un indicador de la interacción de los factores que promueven o inhiben la germinación, así como de los respectivos factores que favorecen o impiden el crecimiento de la radícula. Este índice expresa tanto el porcentaje de semillas germinadas como el porcentaje de crecimiento que alcanza la radícula durante el ensayo.

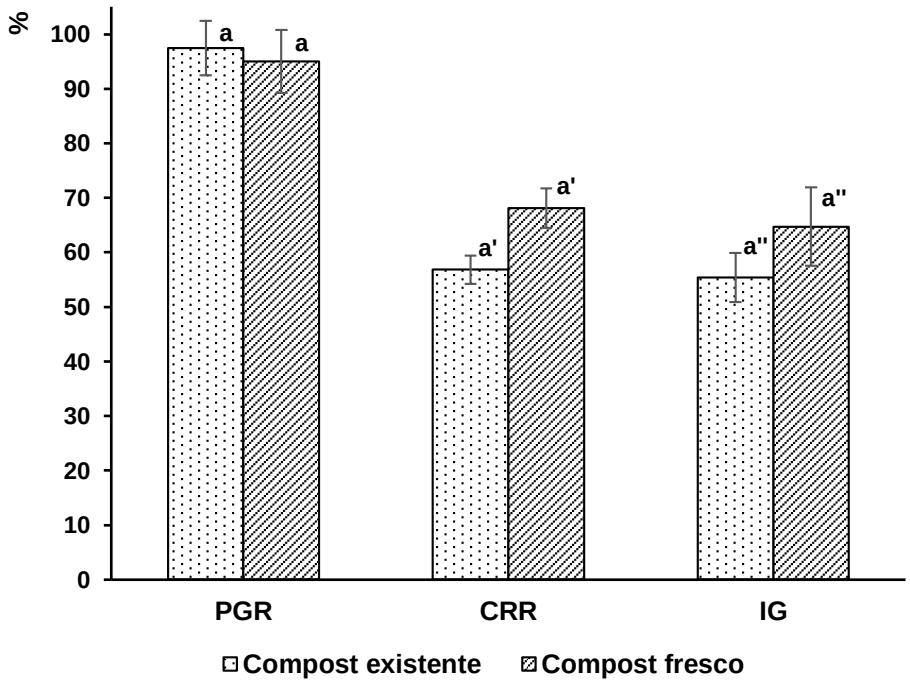


Figura 26: Porcentaje de germinación relativa (PGR), crecimiento radicular relativo (CRR) e índice de germinación (IG) de semillas de Triticum spp. obtenidos con los extractos de compost.

Nota: Valores ± desviación estándar; n=4. Promedios con letra diferente son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$)

Los valores obtenidos con los extractos de las dos unidades muestrales analizadas (Figura 26), señalan que el PGR es superior al 80%, con lo cual, de acuerdo a la Norma Chilena de Compost, se definiría como un material maduro.

Sin embargo, para el CRR, que representa el porcentaje de crecimiento de la radícula de las semillas expuestas a los extractos obtenidos de las unidades muestrales del compost bajo análisis, estas no alcanzaron el 80%.

El índice de germinación (IG) es un indicador más completo (Emino & Warman, 2004; Zucconi et al., 1981) para describir el potencial fitotóxico de un material orgánico, puesto que integra el PGR y el CRR. Al integrar ambos parámetros para obtener el IG, se obtuvo 55.4% para el tratamiento con compost existente, mientras que el compost fresco obtuvo un IG de 64.9%.

De acuerdo a Zucconi et al. (1985, 1981) y Emino & Warman (2004), IG entre 50% y 80% (como el registrado para ambas unidades muestrales) indican fitotoxicidad moderada, concordando con (Tiquia et al., 1996), que considera que el compost puede tener efectos de inhibición si se obtiene índices de germinación por debajo del 80%. Si los valores son superiores al 80% se considera que el material no presenta fitotoxicidad.

De acuerdo con la prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$), no existen diferencias significativas entre los tratamientos con ambas unidades muestrales de compost.

Estos resultados evidencian que tanto el compost existente como el compost fresco tienen un efecto inhibitorio moderado en el desarrollo de las semillas de trigo, debido a la presencia de sustancias fitotóxicas (ácidos orgánicos, fenoles, lípidos, amoniaco, metales pesados, entre otros).

4.5. Efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa

4.5.1. Siembra directa

Este ensayo permitió evaluar la compatibilidad de semillas de trigo (*Triticum spp)* en contacto directo con el compost (al 15%, 30% y 45%) mezclado con arena y arcilla (ÖNORM S2023) en comparación con un sustrato control (suelo estándar). Se calculó el retraso germinativo y la biomasa generada en condiciones controladas a fin de verificar el efecto tóxico que el compost pudiera generar.

En la Figura 27 se observa que los ensayos con compost existente y compost fresco al 15% no presentaron retraso germinativo, esto es, germinaron de modo similar que el testigo. Las demás repeticiones presentaron retrasos de 01 y 02 días para el tratamiento con compost al 30% y de entre 01 y 05 días para el tratamiento con compost al 45%, siendo este el caso en el que se presentó un

mayor retraso en la germinación. La norma austriaca ÖNORM S2023 indica que, para compost libre de toxicidad, con ningún tipo de relación de mezcla puede retrasarse el brote, lo cual no se cumple para los tratamientos al 30% y 45%.

En contraste con el retraso germinativo, la tasa de germinación alcanzó el 100% para todos los tratamientos con ambas unidades muestrales de compost al 15% de concentración. Los tratamientos con concentraciones de compost al 30% tuvieron una tasa de germinación relativamente menor. Con el compost existente al 45% de concentración se obtuvo una tasa de germinación de 43%. Se infiere que, el compost existente, a mayor concentración, ejerce un efecto inhibitorio del desarrollo vegetativo del trigo.

La biomasa se evaluó a los 14 días de iniciado el ensayo. La Figura 28 muestra la variación porcentual de la biomasa generada en tratamientos al 15%, 30% y 45% de concentración de compost existente y compost fresco. De acuerdo con la prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey (α = 0.05), existen diferencias significativas entre los tratamientos con ambas unidades muestrales de compost.

En comparación con los valores obtenidos para el control (100%), la producción en términos de biomasa para los tratamientos al 15% fueron de 117% para el compost existente y 105% para el compost fresco. En cuanto a los valores para los tratamientos al 30%, estos fueron de 57% para el compost existente y de 96% para el compost fresco. El estándar o norma de referencia indica que con la adición de compost al 15% y 30%, la producción en términos de biomasa debe ser ≥ 100%, lo que no se cumple para el tratamiento con compost existente. De hecho, al 30%, la biomasa generada se reduce casi en la mitad de lo sugerido. Para los tratamientos al 45% se obtuvieron valores de biomasa de 15% y 75% para el compost existente y el compost fresco respectivamente. La norma de referencia indica que para concentraciones de 45% de compost, la biomasa generada puede disminuir hasta un valor ≥ 90%, lo cual denota un efecto tóxico ejercido por ambos compost (el existente en mayor medida que el fresco) en la germinación y desarrollo vegetal de las plantas de trigo.

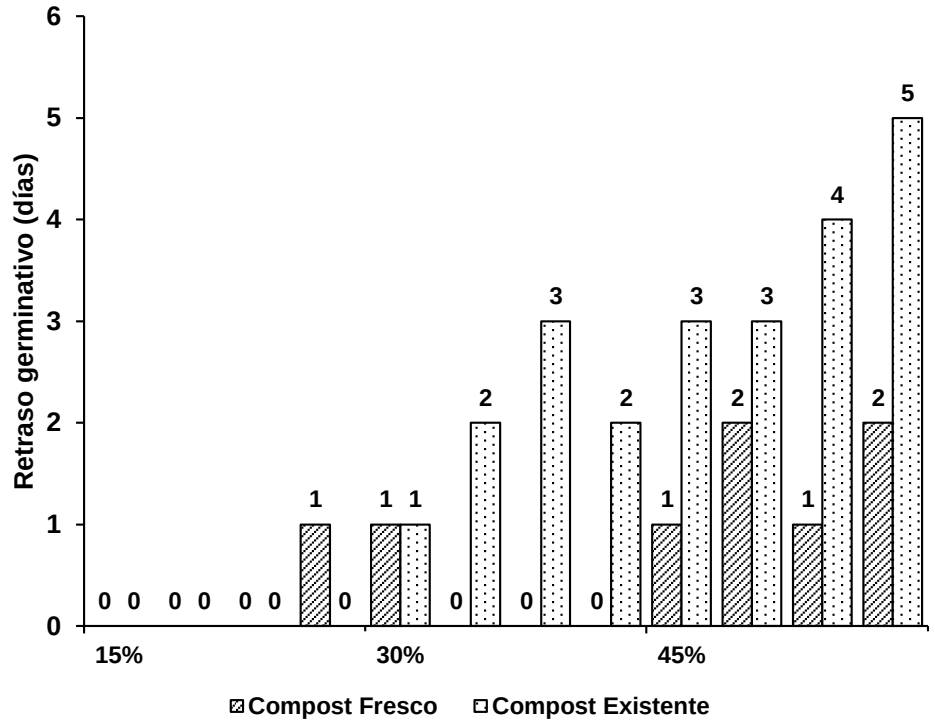


Figura 27: Variación del retraso germinativo de semillas de Triticum spp. registrados para los distintos tratamientos con compost.

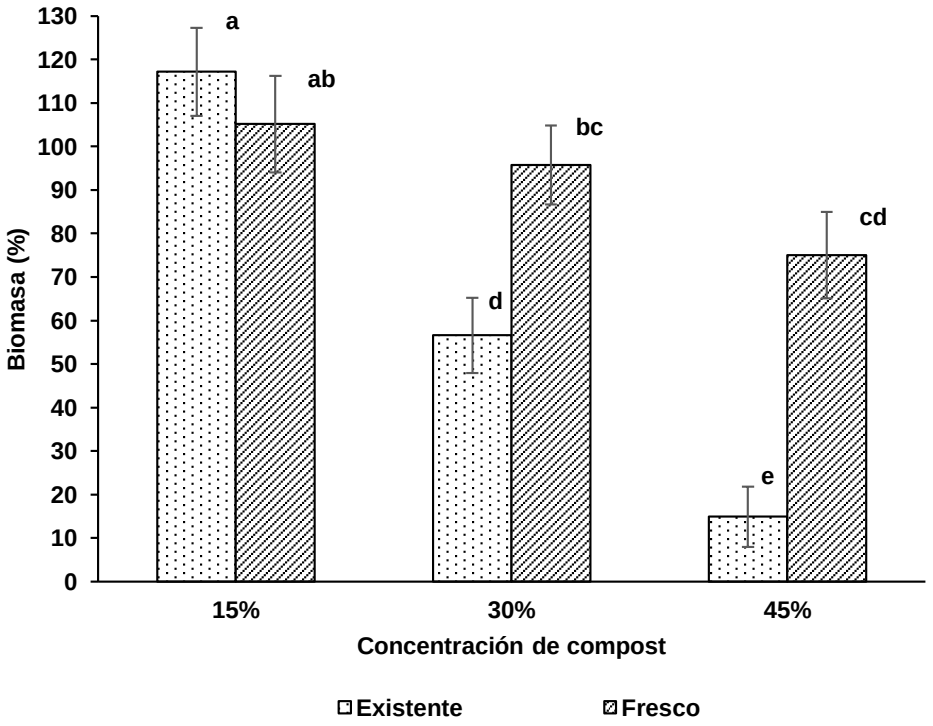


Figura 28: Variación porcentual de la biomasa generada por semillas de Triticum spp. registrada para los distintos tratamientos con compost.

Nota: Valores ± desviación estándar; n=4. Promedios con letra diferente son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$).

4.5.2. Test de cultivo de plantas

Este ensayo permitió evaluar la compatibilidad de las plantas de trigo (*Triticum spp)* en relación con su tolerancia al compost en concentraciones del 25%, 50% y 75% según el test adaptado de barley (FCQAO, 2002) en comparación con un sustrato control (suelo estándar).

Al cabo de los primeros 7 días se cuantificó el número de semillas germinadas en cada tratamiento y se comparó con las semillas germinadas en el testigo. Según la Figura 29, los mejores resultados se obtuvieron con un 25% de compost fresco (35 semillas germinadas). Con un 50% de compost fresco sólo 29 semillas germinaron. Con un 75% de compost fresco, la cantidad de semillas germinadas se reduce a 19. Respecto al compost existente, ni la mitad de las semillas sembradas lograron germinar con la concentración más baja en el período de evaluación mencionado. Para todos los casos, de acuerdo con la prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey (α = 0.05), existen diferencias significativas.

Se evaluó también el número de plantas al término del ensayo (Figura 30), pudiendo comprobarse que, en el compost fresco, crecieron 39 plantas en cada tratamiento. En el ensayo con compost existente, el único tratamiento que igualó el desarrollo de los testigos (40 semillas) fue el que tuvo 25% de compost. Con concentraciones de 50 y 75%, la cantidad de plantas disminuye a 36 y 33 respectivamente.

Respecto al rendimiento de la masa fresca (Figura 31), se determinó que el compost fresco logró un porcentaje superior al requerido (90%) para todos los tratamientos, lo cual podría deberse a que el compost se complementa de manera apropiada con el suelo empleado, aportando nutrientes y materia orgánica, presentando una mejor interacción entre la microflora del compost fresco y del suelo estándar y propiciando el desarrollo de las plantas de trigo. Esta situación se invirtió con el compost existente, cuyos valores para rendimiento de la masa fresca no alcanzaron el 90% recomendado para concentraciones de 25% y es inversamente proporcional con el incremento de su concentración, obteniéndose los valores más bajos en tratamientos con compost al 75%. La prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey (α = 0.05), demuestra que existen diferencias significativas entre los tratamientos.

Se evaluó también la altura media que las plantas alcanzaron al término del ensayo, dato que se relaciona con la biomasa generada en términos de productividad. El mayor crecimiento lo alcanzaron los tratamientos con compost fresco. Con compost existente, la altura fue significativamente menor y su decrecimiento fue inversamente proporcional con el tratamiento empleado (25, 50 y 75%) (Figura 32).

Finalmente se evaluó la sintomatología de las plantas (Figura 33) en función del compost empleado. Se evidenciaron claras muestras de afectaciones en las hojas completamente expandidas, algunas presentaban un color apagado, con cierta debilidad y marchitez y en tratamientos en donde la concentración de compost era mayor se hallaron muchas hojas viejas muertas por desecación.

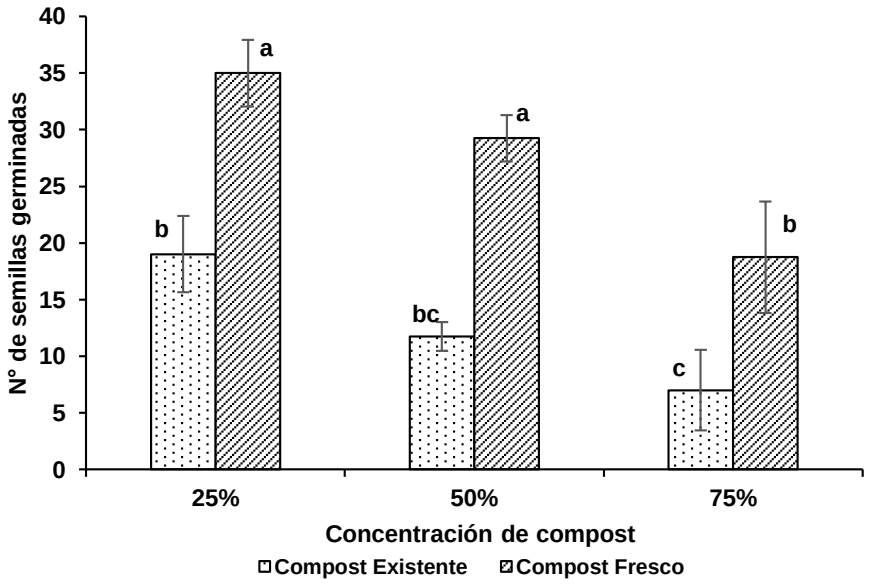


Figura 29: Evaluación de la germinación de semillas en el ensayo de cultivo de plantas

Nota: Valores ± desviación estándar; n=4. Promedios con letra diferente son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$)

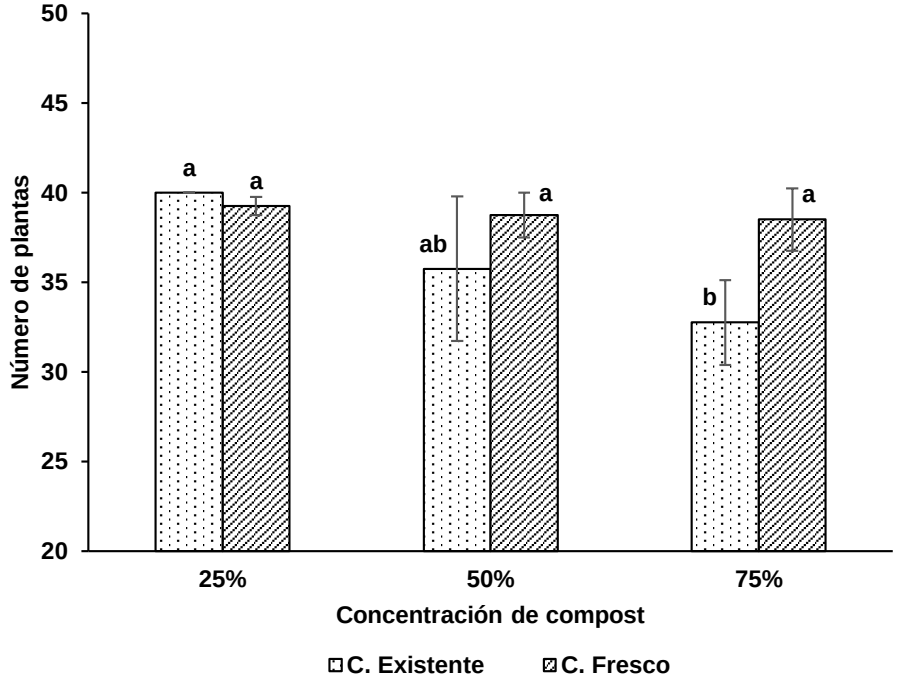


Figura 30: Evaluación del número de plantas al término del ensayo de cultivo de plantas.

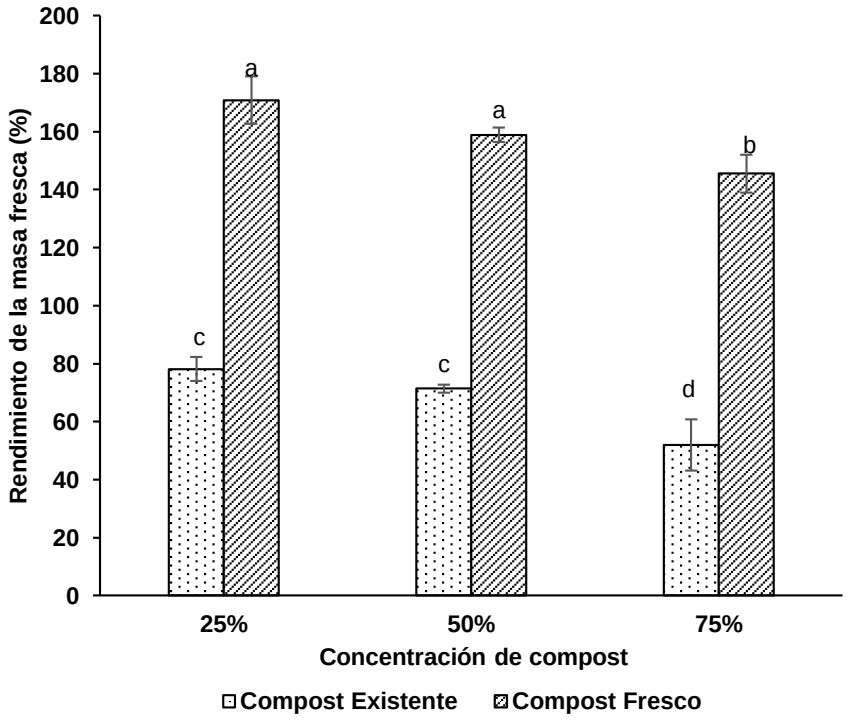


Figura 31: Evaluación del rendimiento de la masa fresca registrado para los distintos tratamientos con compost.

Nota: Para las figuras 31 y 32, valores ± desviación estándar; n=4. Promedios con letra diferente son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$).

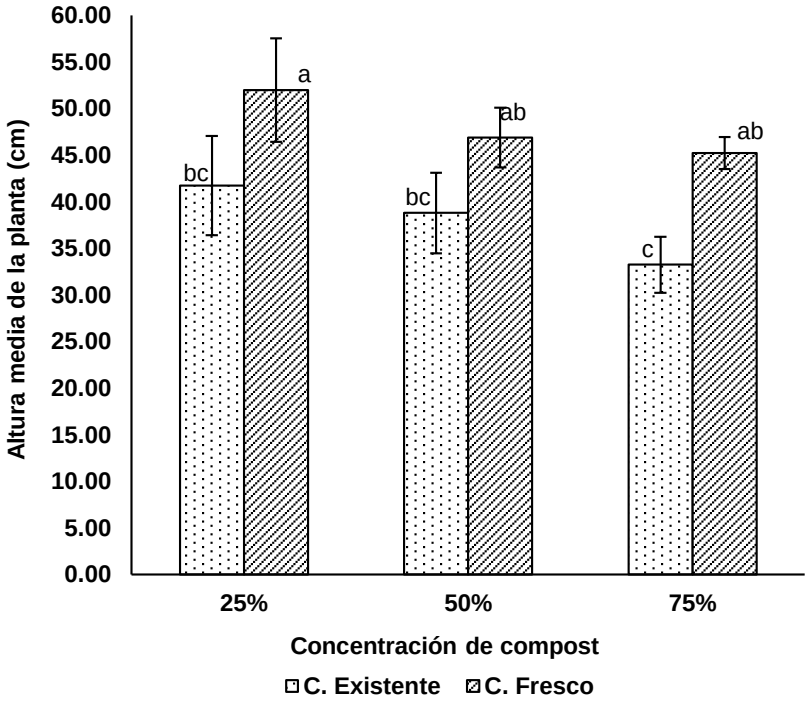


Figura 32: Evaluación de la altura media alcanzada por las plantas al término del ensayo de cultivo de plantas

Nota: Valores ± desviación estándar; n=4. Promedios con letra diferente son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$)

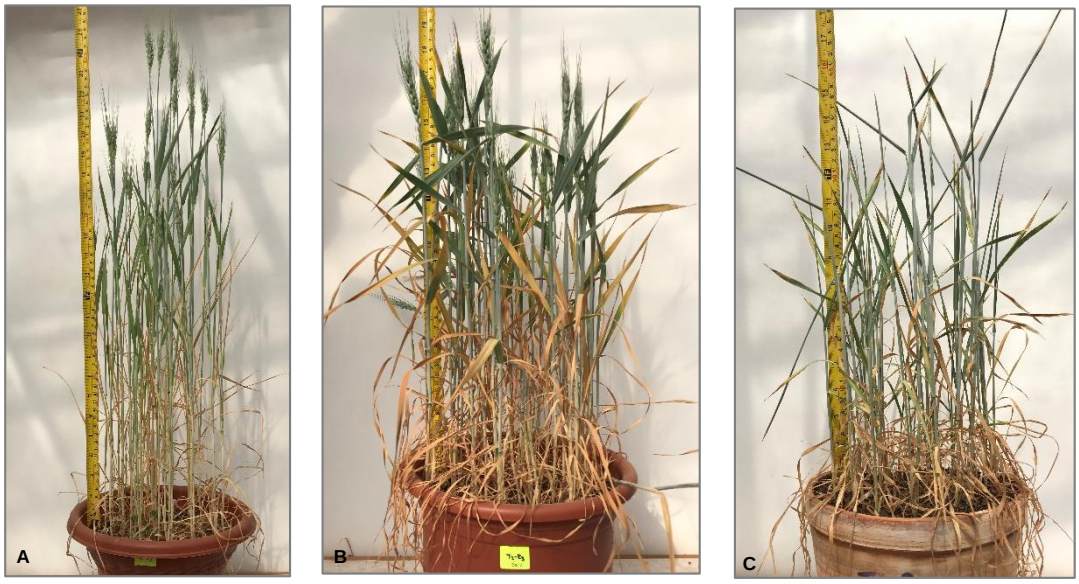


Figura 33: Sintomatología presentada por las plantas durante el ensayo. (A) Tratamiento control, (B) tratamiento con compost fresco al 50%, (C) tratamiento con compost existente al 50%.

CAPITULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Control del proceso de compostaje

Respecto a los valores de temperatura hallados durante el proceso de compostaje, se comprueba que la influencia de los volteos es positiva, ya que ayuda en el mezclado y oxigenación del material, lo que acelera su degradación, evidenciada en la generación de calor por la actividad microbiana. En promedio, las pilas iniciaron el proceso con 18.8 t de residuos orgánicos, con volúmenes alrededor de 13.25 m^3, es por ello que el calor producido por la actividad microbiana no se disipa con tanta facilidad hacia el entorno (Diaz & Savage, 2007), lo que permitió que estas alcanzaran valores de temperatura en el rango termófilo y que estos se mantengan en el tiempo, consiguiéndose así una higienización del material (Madrid et al., 2001; Moreno & Mormeneo, 2008).

Es importante señalar que la relación SA/V, descrita por Malwana et al. (2013), permite verificar si las pilas de compostaje, en función de su tamaño y distribución, están alcanzando la fase termófila.

Como información complementaria se presentan la relación SA/V de las pilas de compostaje que fueron monitoreadas durante la presente investigación, evidenciándose que la pila N° 1 presenta la relación SA/V más baja (1.9) y las temperaturas que alcanzó fueron superiores a las de las demás pilas, estando todas dentro del rango termófilo (Tabla 31, Figura 23).

Tabla 31: Dimensiones de las pilas de compostaje monitoreadas.

Pila de compostaje	Altura de la pila (m)	Longitud de la pila (m)	Ancho de la pila (m)	Área superficial (m2)	Volumen (m3)	Ratio área superficial/ volumen
Pila N° 01	1.9	3.5	2.6	32.28	17.29	1.9
Pila N° 02	1.7	3.4	2.3	27.20	13.29	2.0
Pila N° 03	1.55	3.2	2.3	24.41	11.41	2.1
Pila N° 04	1.5	3.5	2.1	24.15	11.03	2.2

Respecto a los valores de humedad hallados durante el proceso de compostaje, debido a la humedad propia de los residuos empleados, que en su mayoría son desechos de alimentos, la humedad inicial es elevada.

Bueno et al. (2008) refieren que la humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%, por su parte, Haug et al. (1993) señalan que para residuos sólidos urbanos la humedad óptima oscila entre el 50 y 55%. Con base en estas afirmaciones y tal como se puede observar en la Figura 24, la humedad se mantuvo alrededor del 60% a lo largo del proceso, hasta el último volteo (08/03/2018), a partir de esta fecha el compost entró en fase de maduración, registrándose, en la última semana de monitoreo de este parámetro, un promedio de humedad de 37%.

Respecto a los valores de pH hallados durante el proceso de compostaje, durante la fase mesófila inicial, la materia orgánica en proceso de degradación, debido a la acción microbiana (bacterias mesófilas, predominantemente), libera ácidos orgánicos, haciendo que el medio se acidifique, lo que explica los valores alcanzados en el primer control (pH: 5.25). Moreno y Mormeneo (2008) confirman que, en la fase mesófila, la temperatura en la pila de compostaje aumenta desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 42°C, con la aparición de microorganismos mesófilos productores de ácidos; lo que coincide con los resultados de temperatura registrados en las pilas, esto es, en la cuarta semana.

Las altas temperaturas (propias de la fase termófila) aceleran la descomposición de las proteínas, grasas, carbohidratos complejos (celulosa y hemicelulosa) a cargo de hongos, proceso que se da en condiciones alcalinas (Cronjé, 2003).

Con los volteos se incorpora oxígeno a la pila, favoreciendo la disponibilidad de carbono, lo que hace que los valores de pH vuelvan a descender hasta alcanzar el rango de neutralidad en la fase de maduración. Es así que, al término del proceso de compostaje, según las lecturas en campo, la tendencia de variación de pH refleja la estabilización del producto.

Cronjé (2003) refiere que, el proceso de compostaje en toda su extensión, normalmente se da en un rango de pH de 5 a 12. Vistos los resultados del monitoreo de pilas (pH entre 5.3 – 8.3) estos están dentro del rango antes mencionado.

Respecto al control de parámetros sensoriales durante el compostaje, se considera al color del compost como un indicador del grado de humificación (Iglesias et al., 2008). Al tenerse un compost marrón oscuro se infiere que el proceso ha concluido.

La emanación de olores responde a la descomposición de la materia orgánica debido a la que generación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (ácido acético – a vinagre; ácido propiónico – rancio, picante; ácido butírico – olor rancio; ácido valérico – olor desagradable y ácido caproico – olor a calcetines sucios) (García & Sánchez, 2008; Iglesias et al., 2008); que, a pesar de la oxigenación de la pila, producto de los volteos, era recurrente. Esto debido a que probablemente el material se compactaba y el medio se tornaba anaeróbico, generándose sulfuros, ácidos grasos, terpenos, entre otros (Binner et al., 2016). La ausencia de malos olores indica el término del proceso (Iglesias et al., 2008; Iglesias & Pérez, 1989).

La presencia de impurezas en el compost (Tabla 22) es tal que no cumple ni lo recomendado por la bibliografía (la que señala que el tamizado mínimo requerido está entre 4 y 2 mm) ni lo estipulado en normas como la española (Real Decreto 824/2005 sobre productos fertilizantes), que señala que las impurezas eventualmente presentes de diámetro superior a 2 mm no deben superar el 3%.

5.2. Caracterización del compost

Respecto a las características físicas del compost, el valor de humedad para compost existente estuvo por debajo del rango óptimo señalado por la norma, esto se debe a que el compost, una vez cosechado, es almacenado en condiciones inapropiadas que han provocado pérdidas de humedad (Sullivan & Miller, 2001). Incluso, Masaguer & Benito (2008), consideran que el almacenamiento inadecuado del producto final podría afectar la calidad del compost.

La densidad del compost cumple con la norma y es importante ya que informa sobre el manejo y transporte del producto y también sobre su aplicación, aspectos importantes al momento de su comercialización (Soliva, 2001). Para Masaguer & Benito (2008), la densidad se incrementa con el tiempo de compostaje, como consecuencia de una mayor descomposición y una reducción del tamaño de las partículas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos para el compost existente (0.66 $g.cc^{-1}$), de mayor antigüedad frente al compost fresco (0.55 $g.cc^{-1}$).

Como ya se ha mencionado, el contenido de impurezas supera los límites establecidos por diferentes normas de calidad de compost. Al respecto, Campos et al. (2017), en un estudio con compost obtenidos a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU), hallaron relaciones causales positivas entre el nivel de impurezas y la presencia de metales pesados (Zn, Cu, Pb), así como con otros parámetros de calidad como la conductividad eléctrica. El compost analizado en la presente investigación es obtenido de la misma fuente (fracción orgánica de RSU), y, a pesar de que la Municipalidad Provincial de Carhuaz cuenta con un programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de residuos sólidos municipales, estos resultados son clara evidencia de que dicho programa no está siendo efectivo.

Respecto a las características químicas del compost, el pH está dentro del rango indicado por la norma. Este parámetro tiene una incidencia directa sobre la disponibilidad de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, además influyen en la actividad biológica. Valores cercanos a la neutralidad o ligeramente ácidos son los adecuados para el uso del compost en condiciones de cultivo intenso (Masaguer & Benito, 2008).

En cuanto al contenido de COT, este parámetro indica la concentración en materia orgánica y por tanto un índice de calidad del compost. En el caso del nitrógeno, su presencia en los suelos es esencial para las plantas. El compostaje contribuye al reciclaje de este elemento mediante su aplicación agrícola (Masaguer & Benito, 2008). Es importante evaluar su contenido con el fin de ajustar su dosificación, puesto que, al ser un elemento con un gran número de formas con impacto ambiental grave, podría contribuir con la emisión de gases o con la generación de formas iónicas móviles capaces de afectar el agua (Gil-Sotrés, 2001). En cuanto a la relación C/N, este parámetro se considerado como indicador de la madurez y estabilidad del compost (Masaguer & Benito, 2008). De acuerdo con los resultados obtenidos, el compost producido en la Planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz podría catalogarse como estable y maduro.

La materia orgánica presente en el compost permite determinar su calidad agronómica (Kiehl, 1985). Dado que el principal interés en el compost radica en su contenido de materia orgánica y, aunque los valores determinados en este estudio están dentro de los márgenes que Nogales (1993) plantea para la materia orgánica en los compost de RSU (20-60%), debería cuidarse el aspecto de la presencia de impurezas, puesto que el valor de MO es expresado sobre muestras sin impurezas, por lo cual, la segregación en la fuente y la recogida selectiva de los residuos sólidos son la mejor manera de asegurar un compost con contenidos importantes de MO. En la práctica, la cantidad y calidad de la materia orgánica influye, entre otros, sobre diversos procesos bioquímicos y químicos en el sistema edáfico y representa la base de la fertilidad de los suelos (Varnero, 2001).

Acerca de la conductividad eléctrica (CE) determinada en esta investigación, debe considerarse que los compost producidos a base de residuos sólidos urbanos se caracterizan por tener un importante contenido de cloruros y sales, esto debido a que estos residuos están compuestos, en gran parte, por restos de alimentos que han recibido sal durante su cocción; es decir, sales u otros contaminantes que han sido introducidos con las materias primas o han sido incorporados al producto final (Warman, 1999).

La presencia de impropios o impurezas en las muestras analizadas de compost es elevada (Tabla 22), lo que podría generar un efecto negativo en relación a la calidad del compost, asociado a la CE, tal como lo demuestran Campos et al. (2017), quienes identificaron relaciones causales positivas entre impropios especiales y bolsas de plástico sobre la conductividad eléctrica.

Además, la presencia excesiva de sales solubles en el compost puede causar problemas en el crecimiento de las plantas en medios donde la entrada del compost supere valor en torno al 30% en volumen (Moral & Muro, 2008) y/o efectos de deshidratación durante el desarrollo vegetal (Ansorena et al., 2014). Al respecto, Masaguer (2008) señala que los altos contenidos de sales pueden repercutir directamente en la germinación de las semillas y en el desarrollo general del cultivo, todo dependiendo de la tolerancia de los cultivos a la salinidad, del tipo de suelos y de las pautas de riego.

Para Soliva y López (2004), la CE de un compost terminado informa sobre los materiales iniciales con los que este se preparó, el desarrollo y control del proceso de compostaje y sobre la estabilidad del producto final. En este contexto, Barbero et al. (2005) señalan que valores elevados de CE dificultan el manejo de la fertilización de los suelos y pueden ocasionar problemas por fitotoxicidad en el cultivo.

Los efectos del aporte excesivo de sales al suelo, debido a enmiendas orgánicas, son de carácter acumulativo si estas son poco solubles o el suelo tiene drenaje deficiente. Para el caso de los sustratos de cultivo deben mantenerse niveles de salinidad bajos, debido a que el cultivo se va a desarrollar directamente sobre ellos. Por lo tanto, la aplicación de estos compost ha de ser en suelos de baja salinidad y con cultivos capaces de tolerar valores moderados de salinidad, y/o considerando medidas de reducción como el lavado de los suelos mezclados con estos compost (FAO, 2015).

Acerca del contenido de nutrientes, desde el punto de vista de su valor fertilizante o mejorador del suelo (FAO, 2013), es necesario conocer la composición y especies químicas presentes en el compost, para así evaluar la cantidad de elementos nutritivos incorporados al suelo y de prever la cantidad de elementos nutritivos que se pondrán a disposición de la planta (Moral & Muro, 2008).

Moral y Muro (2008) señalan que el contenido de compost en $N+P_2O_5+K_2O$ debe ser superior al 4%. En el contexto de este estudio, lo mencionado anteriormente se cumple solo para el compost fresco ($N+P_2O_5+K_2O$ = 5.48), quedando demostrado que el mayor aporte de nutrientes se da en compost cuyo tiempo de compostaje sea reciente (Bohórquez, Puentes, & Menjivar, 2014).

El calcio, junto con el magnesio, presentes en forma iónica, actúan como reguladores osmóticos e incluso como integrantes de sistemas enzimáticos (J. López & Chueca, 1985), he ahí su importancia como elemento esencial para la formación de estructuras celulares, o, lo que es lo mismo, el crecimiento de las plantas (Cabrera & Rossi, 2016). Es capaz de aumentar el pH del medio y de reducir la fitotoxicidad.

Con relación a los metales pesados presentes en el compost, Rosal et al. (2007) señalan que la incorporación de estos a la materia orgánica procede de una deficiente segregación de los residuos sólidos desde su generación en la fuente, circunstancia observada en el desarrollo de esta investigación. La presencia de estos metales se debe, en muchos de los casos, a:

- La abrasión de superficies con pinturas. Cantanhede et al. (1993) refieren que para colorear plásticos se emplean pigmentos que contienen cadmio (Cd), los mismos que están presentes también en esmaltes, tintas de impresora, etc. El Cd también se encuentra en baterías recargables, como estabilizadores de plásticos de PVC contra la luz ultravioleta y el calor, y en la agricultura a través de fertilizantes fosfatados y pesticidas (Goyer, 1986). El plomo (Pb) procedente de los materiales de construcción y otros metales que están en la composición de productos de higiene, por ejemplo. El cromo (Cr), según Adriano (1986), proviene principalmente de la utilización en la elaboración de pigmentos, baterías de alta temperatura, fungicidas, curtido de pieles, industrias papeleras, entre otros.

- Las condiciones ácidas propias del proceso de compostaje provocan la “disolución” de los metales, incrementando su contenido final en el compost resultante (Soliva & López, 2004).

- El uso de pesticidas y la presencia de los frascos que los contenían dentro de la fracción orgánica. El cobre y el cromo son altamente usados como fungicidas (Adriano, 1986).

Los resultados hallados para Cd son idénticos y/o cercanos a los citados por Iwegbue (2007) y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2007), quienes reportaron valores de 3.3 y 2.0 ppm respectivamente para composts hechos a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales.

Rosal et al. (2007) refieren que con un menor contenido de materia orgánica (la misma que decrece durante el proceso de compostaje), es de esperar un incremento general en el contenido de metales. Esto coincide con los valores reportados del análisis de las unidades muestrales de compost en esta investigación. El compost existente presenta un contenido de materia orgánica menor que el contenido en el compost fresco (24.16% y 33.41%, respectivamente, Tabla 24). Los valores para Pb y Cr son superiores en el compost existente en comparación con los valores registrados para el compost fresco (Tabla 27).

Lindsay y Norvell (1978) comprobaron que un incremento del pH del suelo o en sustratos de origen orgánico hace descender los niveles de metales como el Cr en la solución del suelo, coincidiendo con lo dicho por Jaramillo (2002), que a pH básico, disminuye la disponibilidad de algunos metales pesados. En el estudio se observa que el compost existente presenta un valor de pH de 7.57 y el compost fresco un valor de pH de 7.91 (Tabla 23). Esta variación de pH (0.34) podría estar relacionada con la variación en el contenido de Cr (24.13 ppm en el compost existente y 22.54 en el compost fresco).

La presencia de impropios en el compost no sólo afecta su calidad, sino también permite valorar en qué grado y qué tipo de impropios presenta mayor efecto contaminante y sobre qué parámetros se refleja, tal como lo demuestra Campos et al. (2017). Ellos probaron la existencia de una relación causal positiva entre el nivel de impropios y la presencia de metales pesados como el Pb. En este estudio se verificó que los niveles de impropios o impurezas (53.87% para el compost existente y 48.56% para el compost fresco, Tabla 22) son bastante altos (restos de soldaduras, vidrios, PVC, alambres, restos de latas, metales no férricos, pilas eléctricas, etc.) y son elementos que contienen Pb y que se hallan con frecuencia en el compost terminado.

La presencia de metales pesados en el compost puede perjudicar el crecimiento de las plantas, organismos del suelo y la salud humana y animal. Su impacto sobre los cultivos dependerá no sólo de la concentración de los metales presentes sino también de las propiedades del suelo (García et al., 2008). Por ello, es importante conocer las características del suelo al que se le vaya a aplicar compost con contenidos de metales pesados. Por ejemplo, en suelos con alto contenido de arcilla y pH alcalino, la movilidad y biodisponibilidad de los metales será limitada (Rosal et al., 2007).

Acerca del contenido de sustancias húmicas en el compost; el compostaje, como tecnología de tratamiento de los RSU biodegradables presenta como una ventaja la producción de dichas sustancias (Flotats & Solé, 2007). Su riqueza dependerá del grado de humificación y de la composición de los materiales orgánicos originales, aquellos ricos en lignina generan mayor cantidad de ellas (Stevenson, 1994).

El grado de humificación da una idea de la viabilidad de material de partida a transformar, la calidad de la fracción húmica y la eficiencia del proceso de compostaje empleado (Iwegbue et al., 2006).

La presencia de sustancias húmicas (cuyas características químicas fundamentales son las de formar posiciones de adsorción que retengan cationes polivalentes y se formen complejos organominerales de mayor capacidad de intercambio catiónico (Mora, 2006) permitirá, según lo referido por Zucconi et al. (1985), tanto la retención de nutrientes como la incorporación de moléculas fitotóxicas a la fracción de ácidos húmicos.

En esta investigación (Tabla 28), la relación AH/AF para el compost existente y el compost fresco es de 2.45 y 2.92 respectivamente, lo que indicaría que el compost ha alcanzado un importante grado de humificación.

Respecto a las características microbiológicas del compost, debe considerarse que el uso de RSU para el compostaje implica que parte de estos residuos contengan materiales fecales presentes en el papel higiénico, pañales desechables, condones, residuos médicos, entre otros, que potencialmente presentan microorganismos patógenos perjudiciales para la salud humana (Büttenbender, 2004).

La ausencia de patógenos en el compost se debe, posiblemente, a los altos niveles de temperatura alcanzados durante la fase termófila del proceso de compostaje, que en promedio fueron entre 59.75 °C. Resultados similares fueron los que obtuvo Ytavclerh (2017), en los que fue probada la ausencia de coliformes fecales y *Salmonella sp* en compost de residuos sólidos orgánicos municipales, analizados a los cuatro y cinco meses del inicio del proceso.

Por otro lado, Chauca (2014) obtuvo resultados diferentes. Su estudio involucró la aplicación de microorganismos eficaces activados (EMA) en diferentes proporciones para obtener compost a partir de residuos orgánicos de mercado, así como su obtención sin la intervención de EMA. Fue en este último caso en el que se determinó un alto valor de coliformes fecales (39000 NMP/g), cifra que fue disminuyendo en relación con la proporción de EMA que contenía cada tratamiento. Esto demuestra que no se puede confiar en que el propio proceso eliminará la totalidad de patógenos. Además de la temperatura elevada y el tiempo mínimo requerido, las prácticas como el volteo uniforme y, en algunos casos, el encalado, serán determinantes para lograr la inocuidad del producto (Cantanhede et al., 1993; Cronjé, 2003; Gómez, González, & Chiroles, 2004; Ytavclerh, 2017).

Acerca de la población microbiana presente en el compost estudiado (Tabla 30), no debe dejarse de lado la importancia de los agentes de biocontrol, microorganismos nativos del compost (hongos y actinomicetos) con capacidad de supresión de enfermedades (Hoitink et al., 1997). Es el caso de los actinomicetos, estos organismos pueden producir sustancias antibióticas, las cuales pueden actuar sobre otras especies que pueden ser nocivas para las plantas (Silva, López, & Valencia, 2015). Ha de tenerse en cuenta que la poca o excesiva estabilización del compost puede afectar su capacidad supresora de enfermedades (Hoitink et al., 1997).

5.3. Efecto tóxico germinativo del compost

5.3.1. Índice de germinación

Respecto al crecimiento radicular relativo alcanzado por las plantas durante el ensayo, Varnero et al. (2007) refiere que la disminución del crecimiento de la radícula está relacionada con la presencia de metabolitos moderadamente fitotóxicos, incapaces de limitar la germinación de las semillas, pero sí de limitar el desarrollo de sus radículas.

Comparando el PGR y el CRR, se aprecia este último es un indicador más sensible que el PGR, lo que concuerda con lo observado en estudios similares en los que se hallaron las mayores diferencias en CRR, asociadas a la presencia de metabolitos fitotóxicos moderados (Emino & Warman, 2004).

Acerca del efecto inhibitorio moderado, se puede inferir que el elevado valor de CE podría estar impidiendo que el índice registrado sea mayor. Además, comparando los IG de ambas unidades muestrales, se observa que el índice hallado para el compost fresco es relativamente mayor. Esto podría deberse a que, al tener un mayor contenido de materia orgánica (lo que hace que metales como el Pb y Cr estén disponibles en menor medida), este compost tenga una menor capacidad fitotóxica en las semillas (García et al., 2008).

Zhu et al. (2004) obtuvieron mejores resultados (IG > 85%) en el compostaje de una fuente similar de residuos orgánicos realizado en sistema cerrado con aireación forzada, volteos programados y un control detallado de parámetros relativos a la naturaleza del sustrato como la relación C/N.

Acosta et al. (2006) evaluaron la fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos diferente empleando el método del apilamiento con volteos (sistema abierto). Dicha evaluación se realizó tanto para el material al inicio del proceso (0 días) como para el compost obtenido luego de los 120 días de duración del proceso. De la prueba se obtuvo un IG inicial y final de 23.03% y 51.60% respectivamente, lo que indica que, durante el compostaje, disminuyeron las sustancias fitotóxicas presentes.

Sall et al. (2016) obtuvieron resultados favorables en el compostaje (en sistema cerrado durante 28 semanas) de residuos de fruta y vegetales, mezclados con residuos de granja, y residuos gruesos como material estructurante, obteniendo altos índices de germinación (105% y 122%). Estos resultados pudieron deberse al mayor tiempo de compostaje, la relación C/N inicial y la aireación forzada.

5.4. Efecto del compost en las plantas a través de su aplicación directa

5.4.1. Siembra directa

El ensayo mostró que, con el tratamiento de compost al 15% los resultados de biomasa fresca generada fueron superiores al valor base marcado por el estándar ÖNORM S2023 (≥ 100%). Es el caso del compost fresco, cuyos valores de biomasa generada rondan los niveles considerados como apropiados en términos de calidad. Esto puede deberse a que, determinadas moléculas fitotóxicas han sido incorporadas a la fracción de ácidos húmicos (Zucconi et al., 1985), los mismos que son mayores para esta unidad muestral (3.94%) en comparación con el compost existente. El valor estándar aplica también para tratamientos con compost al 30%, lo cual no se cumple para el compost existente.

El estándar además indica que, para concentraciones de 45% de compost, la biomasa generada puede disminuir hasta un valor ≥ 90%, lo cual no se cumple para las pruebas con compost fresco ni compost existente, ya que la disminución es mucho mayor. Ello denota un efecto tóxico en el desarrollo vegetal de las plantas de trigo. Esto puede deberse al alto contenido de sales, y metales pesados como el Pb y Cd, en el compost, además de la influencia de las impurezas presentes en cantidades considerables.

Emino & Warman (2004) observaron una mejor germinación relativa y un mayor desarrollo de especies vegetales diversas en compost maduro que en compost inmaduro. Cendón et al. (2005) apreciaron diferencias significativas en la producción de berro cultivado en compost de corteza de pino (150%) y cultivado en compost de RSU (90-110%), en comparación con la producción alcanzada por el testigo.

5.4.2. Test de cultivo de plantas

Se observó que el rendimiento de biomasa generada con compost existente es muy bajo, incuso con concentraciones al 25%, lo que puede estar asociado al alto contenido de sales y de metales pesados en concentraciones tales que la planta, probablemente, no puede tolerar.

Cendón et al. (2008) emplearon el método del cultivo de plantas para evaluar la utilización de compost de RSU como sustituto de turba en la elaboración de sustratos de cultivo, emplearon cebada con resultados que indicaban que con un 25% de compost de RSU se superaba el rendimiento ($>$ 100%) alcanzado por la turba. Con las mezclas con compost al 50% se alcanzó un rendimiento del 44%.

El método planteado por la FCQAO (2002) establece rangos de valores frecuentes para el desarrollo de ensayos de cultivo de plantas, los cuales indican que es usual obtener valores de entre 95 - 142% para la mezcla con compost al 25% en volumen y valores de entre 74 - 135% para la mezcla con compost al 50% en volumen. Los rendimientos en masa fresca del compost existente están incluso por debajo de estos rangos.

Acerca de la sintomatología presente en las plantas de trigo, de la observación realizada se comprobó que los síntomas descritos en los resultados iniciaron en la punta de la hoja y se difundieron hacia la base, lo cual es propio de afectaciones por toxicidad por sales (Barbaro et al., 2005; Howard & Gómez, 2001) y afectaciones por deficiencias nutricionales, efecto que puede atribuírsele al elevado contenido de metales como el Pb (Iglesias, 2003).

Díaz et al., (2001) determinó, en un estudio enfocado a determinar la alteración en los procesos fisiológicos del trigo causados por la adición de plomo en 10, 50 y 100 ppm, que en los tratamientos con bajas concentraciones de este metal, se estimulaban el crecimiento de la planta, su eficiencia fotosintética y su capacidad para absorber nutrientes. Los primeros síntomas de toxicidad se vislumbraron, con concentraciones a partir de 50 ppm, en la etapa de espigamiento, con efectos adversos en la absorción de nutrientes, evidenciados por la aparición de franjas cloróticas en las hojas; y en la etapa de madurez, con altas acumulaciones de Pb en follaje y espigas.

5.5. Calidad agronómica del compost

Con base en las determinaciones realizadas luego de los análisis de laboratorio y ensayos biológicos, y considerando que para que el compost sea una alternativa viable, debe tener una calidad agronómica adecuada en el tiempo, además que, de no cumplir con ciertos criterios mínimos de calidad, su aplicación puede ocasionar diversos inconvenientes, probados en esta investigación, como la inhibición del crecimiento vegetal en sus diversas etapas, manifestado en sintomatologías en las plantas, a causa del alto contenido de sales y del incremento del grado de disponibilidad de los metales pesados con potencial fitotóxico, con un consecuente efecto depresivo en el rendimiento de los cultivos (Garcia et al., 2014; Iglesias, 2003).

Las unidades muestrales analizadas, en relación con sus características físicas, presentan valores permisibles de humedad (salvo el compost existente) y densidad. La cantidad de impurezas es bastante elevada, pudiendo ser la causa de otras afectaciones a nivel químico ya descritas.

En cuanto a las características químicas, los valores de pH, COT, N y relación C/N son adecuados. Sucede lo mismo con la materia orgánica, aunque con diferencias entre las unidades muestrales que, junto con la variación de pH, podría estar promoviendo la biodisponibilidad de algunos metales pesados.

Estos últimos sí superan el límite de calidad (en Pb y Cd), y sus efectos se hacen notar en la prueba biológica de cultivo de plantas. La conductividad eléctrica es bastante elevada para ambas unidades muestrales, considerando la fuente (fracción orgánica de RSU) y vistos algunos antecedentes (Najar, 2012) en los que se registraron valores similares y hasta superiores, ha de suponerse que los valores para este parámetro son frecuentes y, por tanto, perjudiciales en la germinación de semillas y en el desarrollo general del cultivo, esto es, dependiendo de su uso y de las condiciones propias de la experiencia. Los nutrientes están presentes en valores apropiados, sin embargo, el valor nutritivo del compost es muy variable debido a la naturaleza de los materiales que se están compostando.

Finalmente, la presencia de sustancias húmicas en las unidades muestrales es indicador de que el proceso de compostaje desarrollado en la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz atraviesa todas sus etapas hasta concluir en la maduración, tiempo en el cual se produce la humificación.

Respecto de las características microbiológicas, las unidades muestrales no presentan patógenos, convirtiéndose en un material inocuo. Adicionalmente se determinó la presencia de hongos y actinomicetos con potencial para servir como agentes de biocontrol de patógenos foliares, vasculares y radiculares (Hoitink et al., 1997), algo que deberá ser comprobado en futuras investigaciones.

Las pruebas biológicas realizadas, utilizando trigo como especie indicadora, demostraron que la aplicación del compost analizado ejerce un efecto fitotóxico en diversos niveles, el mismo que se acrecienta según la proporción volumétrica empleada. La germinación es inhibida (demostrado según el índice de germinación); la generación de biomasa fresca en el ensayo de siembra directa es aceptable para tratamientos con compost al 15%, y aminora en concentraciones de 30 y 45%. Lo mismo sucede con el retraso germinativo. La prueba de cultivo de plantas fue la que reveló mayores afectaciones en las plantas de trigo, en principio por la baja capacidad germinativa al comienzo de la experiencia y la menor cantidad de plantas desarrolladas al final de la misma. El rendimiento de la masa fresca fue evaluado con composiciones volumétricas de compost al 25, 50 y 75%, con resultados favorables para el compost fresco, lo que podría deberse a que esta unidad muestral mantuvo una mejor interacción con el suelo.

Sin embargo, la observación de las plantas evidenció una serie de afectaciones respecto de la coloración de las plantas, la desecación y clorosis en hojas y con posibles deficiencias nutricionales, efectos atribuibles al elevado contenido de sales y metales pesados y su capacidad fitotóxica.

Para todos los ensayos biológicos, el compost existente tuvo una mayor capacidad limitante del desarrollo general de las plantas y/o un efecto más marcado en la presencia de afectaciones en las mismas.

De todo lo anteriormente mencionado, el compost producido a base de la fracción orgánica de los RSU de Carhuaz, siguiendo la técnica de compostaje manual empleada por la planta de tratamiento puede ser valorado, en función de la calidad, como mejorador del suelo. Esto es posible si se quisiera usar en la preparación de terrenos en los que se requiera de su aplicación regulada (es decir, en proporciones volumétricas que estimen las cantidades probables de sales y metales pesados que vayan a ser incorporados al medio) y deba ser mezclado con el suelo a cierto nivel de profundidad. Así, su aporte de nutrientes y materia orgánica tendría un efecto positivo sobre especies vegetales específicas. Otros usos recomendables son, por ejemplo, en la recuperación de suelos compactados, degradados o en el control de su erosión. La remediación de suelos contaminados es otro destino eficiente, reduciendo la movilidad y/o biodisponibilidad de elementos traza debido a su contenido de ácidos húmicos con capacidad de adsorción. En el contexto de la gestión y manejo de los residuos sólidos, el compost se podría utilizar también para el sellado de vertederos y restauración paisajística de botaderos. No se recomienda su uso como sustrato, en viveros o para horticultura debido a su potencial fitotóxico identificado.

La calidad de este compost podría mejorarse considerando la no inclusión de productos como los residuos inorgánicos que tienen algún grado de peligrosidad, residuos del barrido de calles (por su elevado contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos – HAP), animales muertos por zoonosis, etc.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- De la caracterización del compost producido por la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz y su comparación con las normas de calidad de compost, se concluye que:

  - Para las características físicas, la humedad se pierde debido a que las condiciones de almacenamiento no aseguran su preservación. Los valores de densidad aparente están dentro de los rangos óptimos. El contenido de impurezas supera en demasía el valor límite sugerido por las normas.

  - Para las características químicas, el pH, el %N y la relación C/N están dentro de los rangos óptimos. El contenido de materia orgánica es superior al mínimo requerido. La CE del compost supera el límite establecido por la norma. El contenido de nutrientes es favorable. La presencia de metales pesados es elevada. Las sustancias húmicas están presentes en cantidades significativas.

  - Para las características microbiológicas, los organismos patógenos están ausentes en el compost.

- Se determinó el efecto tóxico del compost aplicado a semillas de trigo *(Triticum spp*) en 3 niveles de evaluación: germinación, siembra directa y cultivo de plantas.

- Según la prueba de germinación, el compost es moderadamente fitotóxico.

- Según la prueba de siembra directa, el compost es apropiado en términos de calidad a una concentración del 15%. La utilización de compost al 30 y 45% en composición volumétrica es considerada inhibitoria para el desarrollo de la biomasa, lo que significa que el compost presenta un efecto tóxico.

- Según la prueba de cultivo de plantas, se determinó que las plantas de trigo son tolerantes al compost en concentraciones del 25%. La utilización de compost al 50 y 75% en composición volumétrica es considerada tóxica para las plantas, evidenciado por la disminución en la tolerancia, lo cual está respaldado tanto por el menor rendimiento de la masa generada como por los criterios de productividad evaluados: germinación y recuento de plantas, altura de las mismas y sintomatologías asociadas.

- El compost producido en la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz presenta una calidad agronómica media, siendo su uso más apropiado el de mejorador del suelo, esto es, usarlo en la preparación de terrenos en los que se requiera de su aplicación regulada y deba ser mezclado con el suelo a cierto nivel de profundidad.

- Como parte de la caracterización del proceso productivo, del control del proceso de compostaje se concluye que:

  - Los parámetros de seguimiento registran valores que están dentro de los rangos sugeridos por la bibliografía. Respecto a la temperatura, las pilas de compost atraviesan todas las fases, asegurando la higienización del material al término del proceso. La humedad se mantuvo constante garantizando que los procesos microbianos se llevan a cabo. El pH varió conforme se desarrolló la transformación de los residuos en compost.

  - Los parámetros sensoriales de madurez indicaron que, en cuanto al color, el material alcanzó el estado de humificación. Los olores disminuyeron al término del proceso. El contenido de impurezas superó los valores mínimos requeridos, comprometiendo la calidad del producto.

6.2. RECOMENDACIONES

- Continuar con estudios que permitan conocer la relación entre el alto contenido de impurezas presentes en el compost como posible causa de la dilución de los elementos fertilizantes y la consecuente pérdida de su calidad.

- Continuar con estudios que permitan evaluar la concentración de contaminantes orgánicos en el compost (HAPs, bifenilos policlorados, cloropropanos, etc.)

- Desarrollar estudios para la cuantificación de metales pesados a nivel de hojas, tallos y granos.

- Desarrollar estudios para evaluar la capacidad de complejación de los ácidos húmicos presentes en el compost.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Adriano, D. C. (1986). *Trace Elements in Terrestrial Environments*. New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5

Alarcón, F. (2004). *Evaluación del uso de diferentes técnicas biotecnológicas para la producción de compost*. UNALM.

Albuquerque, J. A., González, J., García, D., & Cegarra, J. (2006). Measuring detoxification and maturity in compost made from “alperujo”, the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system. *Chemosphere*, *64*(3), 470–477. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.10.055

Anastasi, A., Varese, G. C., & Filipello Marchisio, V. (2005). Isolation and identification of fungal communities in compost and vermicompost. *Mycologia*, *97*(1), 33–44. https://doi.org/10.3852/mycologia.97.1.33

Ansorena, J., Batalla, E., & Merino, D. (2014). Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos , enmiendas y abonos orgánicos. *Escuela Agraria Fraisoro*, 1–67. https://doi.org/10.1007/s10661-009-0821-0

Araújo, A. S. F., & Monteiro, R. T. R. (2005). Plant bioassays to assess toxicity of textile sludge compost. *Scientia Agricola*, *62*(3), 286–290. https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000300013

Argentel, L., González, L. M., López, R., Fonseca, I., & Girón, R. (2008). Efecto de la salinidad sobre la fenología, los componentes del rendimiento y su relación con la tolerancia varietal a la salinidad en trigo (Triticum aestivum y T. durum). *Cultivos Tropicales*, *29*(3), 53–57. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193221653010

Aubert, C. (1998). *El huerto biológico*. Barcelona, España: Editorial Integral.

Badr EL-Din, S. M. S., Attla, M., & Abo-Sedera, S. A. (2000). Field assessment of composts produced by highly affective celulolytic microorganisms, *32*(1), 35–40.

Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (2005). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica en los sustratos para plantas*. *Ministerio de Agricultura, Ganaderia y Pesca*. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_importancia_del_ph_y_la_conductividad_elctrica.pdf

Bernal, M. P., & Gondar, D. M. (2007). Producción y gestión de residuos orgánicos: situación actual a nivel mundial, comunitario y estatal. En *Compostaje* (pp. 9–42).

Beteta Alvarado, V. M. (s/f). *Efecto tóxico de la aplicación del compost de tres plantas de compostaje*.

Bidlingmaier, W., & Müsken, J. (2007). Odor Emissions from Composting Plants. *Compost Science and Technology*, 215–325.

Binner, E., Méndez, C., & Miyashiro, V. R. (2016). *Gestión de residuos sólidos municipales en el Perú y en Austria*. Lima: Fondo Editorial - UNALM.

Bueno, P., Diaz, J., & Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de Compostaje. En *Compostaje* (p. p1107). https://doi.org/10.1002/adma.201604105

Butler, T. A., Sikora, L. J., Steinhilber, P. M., & Douglass, L. W. (2001). Compost Age and Sample Storage Effects on Maturity Indicators of Biosolids Compost. *J. Environ. Qual.*, *30*, 2141–2148. https://doi.org/10.2134/jeq2001.2141

Büttenbender, S. E. (2004). *Avaliaçao Da Compostagem Da Fraçao Orgânica Dos Resíduos Sólidos Urbanos Provenientes Da Coleta Seletiva Realizada No Município De Angelina/Sc*.

Cabrera, V., & Rossi, M. G. (2016). *Propuesta para la elaboración de compost a partir de los residuos vegetales provenientes del mantenimiento de las áreas verdes públicas del distrito de Miraflores*. https://doi.org/10.1038/nature10240

Campos, L., Puig, I., García, A., Guerrero, T., López, M., & Martínez, F. (2017). Incidencia de los materiales impropios sobre la calidad del tratamiento biológico de Cataluña. *Revista Técnica de Medio Ambiente*, 46–52.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2005). Guidelines for Compost Quality, 26. Recuperado de http://www.ccme.ca/files/Resources/waste/compost_quality/compostgdlns_1340_e.pdf

Cantanhede, A., Monge, G., & Wharwood, G. (1993). *Compostificación de residuos de mercados*. Lima, Perú.

Castillo, N. J. (1998). *Estudio para la recolección y disposición de desechos sólidos en las localidades de Nor Yungas*. UMSA.

Cendón, Y., Moldes, A., & Barral, M. T. (2005). Municipal solid waste compost and composted pine bark as alternative substrates to Sphagnum peat. En *II Congreso sobre residuos biodegradables y compost.* Sevilla.

Cendón, Y., Moldes, A., & Barral, M. T. (2008). Evaluation of municipal solid waste compost as a growing media component for potted plant production. *Acta Horticulturae*, *779*(January 2016), 591–598. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.779.76

Cesare Coral, M. F. (s/f). Caracterización química y ecotoxicológica del compost de Aucayacu. *CIQTOBIA - UNALM*.

Chanyasak, V., Katayama, A., Hirai, M. F., Mori, S., & Kubota, H. (1983). Effects of compost maturity on growth of komatsuna (brassica rapa var. pervidis) in neubauer's pot. *Soil Science and Plant Nutrition*, *29*(3), 239–250. https://doi.org/10.1080/00380768.1983.10434625

Chica, A. F., & García, J. L. (2008). Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje Dpto. En *Compostaje* (Vol. 6, p. 142).

Cisterna, P. (2004). *Gestión de Residuos Sólidos*.

Contardi, L. T., & De Errasti, A. (2012). Evolución de la temperatura en pilas de compostaje de residuos agroforestales. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26668

Coventry, E., Noble, R., Mead, A., & Whipps, J. M. (2002). Control of Allium white rot (Sclerotium cepivorum) with composted onion waste. *Soil Biology and Biochemistry*, *34*(7), 1037–1045. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00037-8

Cronjé, A. L. (2003). *Ammonia emissions and pathogen inactivation during controlled composting of pig manure*. University of Birmingham.

Crowe, M., Nolan, K., Collins, C., Carty, G., Donlon, B., & Kristoffersen, M. (2002). Biodegradable municipal waste management in Europe. Part 3: Technology and market issues, (January), 1–32. Recuperado de https://www.eea.europa.eu/publications/topic_report_2001_15_Part3/at_download/file

Dalzell, H. W. (1991). *Manejo del suelo : producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?id=WgZ47ud_bpoC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false

Decreto Legislativo Nº 1278. (2016), 607472–607488.

Devleeschauwer, D., Verdonk, O., & Van Assche, P. (1981). Phytotoxicity of refuse compost. *Biocycle*, *22*, 44–46.

Díaz, I., Larqué, M., Alcántar, G., Carrillo, R., & Vásquez, A. (2001). Alteración de algunos procesos fisiológicos en trigo por la adición de plomo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *17*(2), 79–90. Recuperado de https://www.redalyc.org/pdf/370/37017203.pdf

Díaz, I., Larqué, M., Alcántar, G., Vázquez, A., González, F., & Carrillo, R. (2001). Acumulaciones toxicas de níquel en el crecimiento y lanutrición de trigo. *Terra Latinoamericana*, *19*(3). Recuperado de https://www.redalyc.org/html/573/57319301/

Díaz, M. J., Madejón, E., Cabrera, F., Jiménez, L., & De Bertoldi, M. (2004). Using a second-order polynomial model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in-vessel composting. *Compost Science and Utilization*, *12*(3), 273–279. https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702192

Dick, W. A., & McCoy, E. L. (1993). Enhancing soil fertility by addition of compost. En *Science and engineering of composting: Design, environmental, microbiological and utilization aspects* (pp. 622–624).

Dupuis, I. (2008). *Guia para la intervención de los residuos agrarios*. (Sociedad Agrícola del campo La candelaria, Ed.).

Ekinci, K., Keener, H. M., Elwell, D. L., & Michel, F. C. J. (2004). Effects of Aeration Strategies on the Composting Process: PART I. Experimental Studies. *Transactions of the ASAE*, *47*(5), 1697–1708.

Emino, E. R., & Warman, P. R. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost Science and Utilization*, *12*(4), 342–348. https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702203

Environmental Protection Agency (EPA). Environmental regulations and technology: control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (2003). Estados Unidos.

FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2008.11.012

FAO. (2015). SALINE SOILS AND THEIR MANAGEMENT. Recuperado el 25 de febrero de 2019, de http://www.fao.org/3/x5871e/x5871e04.htm

FCQAO. (1994). *Methods book for the analysis of compost - in addition with the results of the parallel interlaboratory test*. Stuttgart, Germany.

Federal Compost Quality Assurance Organisation. (2002). *Methods Book for the Analysis of Compost*. *Publishing House*. Germany. Recuperado de http://www.kompost.de/fileadmin/docs/shop/Grundlagen_GS/Methods_Book_2002.pdf%0Ahttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Methods+Book+for+the+Analysis+of+Compost#0

Felipó, M. T., & Soliva, M. (2003). Organic wastes as a resource for Mediterranean soils. En H. Langenkamp & M. Marmo (Eds.), *Biological Treatment of Biodegradable Wastes*. Brussels.

Flotats, X., & Solé, F. (2007). Situación actual en el tratamiento de los residuos orgánicos: aspectos científicos, económicos y legislativos. En *Compostaje* (pp. 43–74). Mundi Prensa Libros S. A.

Fortun, C., Diaz-Burgos, M. A., Fortun, A., & Polo, A. (1995). The value of fertilizers from composting sewage sludge and slivers from pruning trees, 39.

Galea, Z. (2013). *Ensayo de producción y caracterización de compost a partir de residuos de guacamole, poda y gallinaza*. Sevilla. Recuperado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/80186/1/Ensayo de producción.pdf

Garcia C., D., Lima C., L. A., Ruiz G., L., & Calderon P., P. A. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, (26), 1–11.

García, I., Pineda, J., Totosaus, A., & González-González, L. (2008). Evaluación de la presencia de metales pesados en compostas. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria*, *7*(7), 91–99.

Gariglio, N. F., Buyatti, M. A., Pilatti, R. A., Gonzalez Russia, D. E., & Acosta, M. R. (2002). Use of a germination bioassay to test compost maturity of willow (Salix sp.) sawdust. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, *30*(2), 135–139. https://doi.org/10.1080/01140671.2002.9514208

Garrabou, R., & Naredo, J. M. (1996). *La fertilización en los sistemas agrarios. Una perspectiva histórica.* Colección Economía y Naturaleza.

Gotaas, H. B., & World Health Organization. (1956). *Composting: Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes*. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*.

Guerrero, A. (1999). *Cultivos herbáceos extensivos* (6a ed.). España.

Haug, R. T., Raton, B., New, L., & Washington, Y. (1993). The Practical Handbook of COMPOST ENGINEERING. *F. Boca Raton, Ed.*

Hoitink, H. A. J., & Boehm, M. J. (1999). Biocontrol Within the Context of Soil Microbial Communities: A Substrate-Dependent Phenomenon. *Annual review of phytopathology*, *37*, 427–446.

Hoitink, H. A. J., Stone, A. G., & Han, D. Y. (1997). Supresión de enfermedades de plantas mediante compost. *Agronomía Costarricense*, *21*(1), 25–33.

HONDUPALMA. (2011). *Manejo de residuos sólidos. Una guía para socios y personal de Hondupalma*. *Journal Article* (Vol. Primera). Tegucigalpa. Recuperado de http://www.snvla.org/mm/file/Guia manejo de residuos.pdf

Howard M., R., & Gómez Macpherson, H. (2001). *Trigo regado: manejo del cultivo*. FAO. Recuperado de http://www.fao.org/3/x8234s/x8234s00.htm#Contents

Huerta, O., López, M., Soliva, M., & Zaloña, M. (2008). *Compostaje de residuos municipales*. Recuperado de http://www.google.co.ve/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CC4QFjAC&url=http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/9087/1/Compostatge de Residus Municipals_ESAB_CAT.pdf&ei=XTF4UJnVOsnp0gG1gIGgBA&usg=AFQjCNH8BsxqS0xIhFmU3XuXwjool2b1FA&sig2

Iannotti, D. A., Grebus, M. E., Toth, B. L., Madden, L. V, & Hoitink, H. A. J. (1994). Oxygen Respirometry to Assess Stability and Maturity of Composted Municipal Solid-Waste. *Journal of environmental quality*, *23*(6), 1177–1183. https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300060007x

Iannotti, D. A., Pang, T., Toth, B. L., Elwell, D. L., & Keener, H. M. (1993). A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Science and Utilization*, *1*(3), 52–65. https://doi.org/10.1080/1065657X.1993.10757890

Iglesias, E., Barral, M., & Marhuenda-egea, F. (2008). Indicadores de la estabilidad y madurez del compost. En *Compostaje* (pp. 243–284).

Iglesias Jiménez, E. (2003). Aspectos físico- bioquímicos y microbiológicos del proceso de Evaluación de la calidad. *Guía para compostaje y manejo de suelos*, 1–30.

Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1989). Evaluation of City Refuse Compost Maturity : A Review. *Biological Wastes*, *27*(May), 115–142. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0269-7483(89)90039-6

Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1992). Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some “humification” indexes. *Resources, Conservation and Recycling*, *6*(3), 243–257. https://doi.org/10.1016/0921-3449(92)90034-Y

Ingelmo Sánchez, F., & Rubio Delgado, J. L. (2008). Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. En *Compostaje*.

Iwegbue, C. M. A., Egun, A. C., Emuh, F. N., & Isirimah, N. O. (2006). Compost Maturity Evaluation and its significance to agriculture. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *9*(15), 2933–2944.

Iwegbue, C. M. A., Emuh, F. N., Isirimah, N. O., & Egun, A. C. (2007). Fractionation, Characterization and Speciation of Heavy Metals in Composts and Compost-Amended Soils. *African Journal of Biotechnology*, *6*(2), 67–78. https://doi.org/10.1002/chin.200748228

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. *Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Jeris, J. S., & Regan, R. W. (1973). Controlling environmental param- eters for optimum composting. Part I. *Compost Science*, *14*, 10–15.

Jhorar, B. S., Phogat, V., & Malik, R. S. (1991). Kinetics of Composting Rice Straw with Glue Waste at Different Carbon: Nitrogen Ratios in a Semiarid Environment. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, *5*(4), 297–306. https://doi.org/10.1080/15324989109381289

Kapustka, L. (1997). Selection of phytotoxicity tests for use in ecological risk assessments. En *Plants for Environmental Studies* (pp. 515–548). https://doi.org/doi:10.1201/9781420048711.ch17

Kiehl, F. J. (1985). Fertilizantes orgânicos.

Ligon, P. J., & Garland, G. (1998). Analyzing the costs of composting strategies. *BioCycle*, *39*(11), 30–+.

Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal*, *42*(3), 421–428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x

López-Cepero, J. (2010). Seminario sobre valorización de subproductos y residuos agroindustriales. Compostaje como gestión de residuos: el caso de la platanera en Canarias La Palma.

López, J., & Chueca, A. (1985). Papel biológico de los nutrientes en la planta. En M. Lachica & C. González (Eds.), *Nutrición vegetal: Algunos aspectos químicos y biológicos* (pp. 1–41). Granada, España.

López, M. E., & Sainz, M. J. (2011). *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. *Servizo de Publicacións e Intercambio Científico*. Universidad de Santiago de Compostela.

Losada, bermeo jesus david. (2009). Caracterización de los lixiviados generados en el proceso de compostaje provenientes de residuos organicos de la plazas de mercado y su uso como complemento nutricional para cultivos hidroponicos.

Lyon, T. (2000). Proceedings of "L'agriculture biologique face a son développement _ les Enjeux futurs". Baden, Australia.

Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop Salt Tolerance, Current Assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *103*, 115–134.

Madejón, E., Jesús Díaz, M., López, R., & Cabrera, F. (2001). Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Bioresource Technology*, *76*(3), 275–278. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00126-7

Madejón, E., Pérez de Mora, A., Felipe, E., Burgos, P., & Cabrera, F. (2006). Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. *Environmental Pollution*, *139*(1), 40–52. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.04.034

Madrid, F., López, R., Cabrera, F., & Murillo, J. M. (2001). Caracterización de los composts de residuos sólidos urbanos de la planta de Villarrasa (Huelva). *Investigación agraria. Producción y protección vegetal*, *16*(1), 105–117. Recuperado de http://sia.revistas.inia.es/index.php/iappv/article/view/101%5Cnfile:///C:/Documents and Settings/Martha C. Daza/Mis documentos/GC/EXP/Maestria/PROYECTO DE GRADO/Articulos proyecto/Caracterizaci?n de los composts de residuos s?lidos urbanos.pdf

Malwana, C., Weerasinghe, T. K., & Pilapitiya, S. (2013). Determination of Optimal Pile Dimensions during Thermophillic Windrow Composting of Municipal Solid Waste (Msw) in Sri Lanka. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, *3*(6), 552–556. https://doi.org/10.7763/IJBBB.2013.V3.274

Masaguer, A., & Benito, M. (2008). 12. Evaluación de la calidad del compost. En *Compostaje* (pp. 285–304).

Mazzarino, M. J. (2012). De residuos a recursos: el otro camino de los desechos orgánicos urbanos. Estudio de caso: compostaje de lodos cloacales en Bariloche, Argentina. *IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Univ. S Tomás.*, 14. Recuperado de http://www.ambiente.gob.ar/archivos/web/DPGC/file/Mazzarino-Conferencia Tunja-2012 (1).pdf

Mench, M., Bussière, S., Boisson, J., Castaing, E., Vangronsveld, J., Ruttens, A., … Manceau, A. (2003). Progress in remediation and revegetation of the barren Jales gold mine spoil after in situ treatments. *Plant and Soil*, *249*(1), 187–202. https://doi.org/10.1023/A:1022566431272

Michel, F. C., Pecchia, J., Rigot, J., & Keener, H. M. (2004). Mass and nutrient losses during composting of dairy manure with sawdust versus straw amendments. *Compost Sci. Util.*, *12*, 323–334. Recuperado de http://www.oardc.ohio-state.edu/michel/Pdf-Publications/CS%26Udairycompostfinal.pdf

MINAM. (2018). *Información reportada por los gobiernos locales mediante la plataforma SIGERSOL y Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos*.

Miyatake, F., & Iwabuchi, K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, *97*(7), 961–965. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.035

Mollinedo Suntura, Z. (2009). *Determinación de la calidad de compost, elaborado a partir de residuos sólidos orgánicos en el municipio de puerto mayor Carabuco, provincia Camacho*. Universidad Mayor de San Andrés. Recuperado de http://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/5011

Mora, J. (2006). *Contribuciones del compost al mejoramiento de la fertilidad del suelo*. Costa Rica. Recuperado de http://vip.ucaldas.edu.co/lunazul/downloads/Lunazul9_10_9.pdf

Moral, R., & Muro, J. (2008). Manejo, dosificación y gestión agronómica del compost. En *Compostaje* (pp. 351–378).

Moreno, J., & Mormeneo, S. (2008). Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. En *Compostaje* (pp. 111–140). Madrid: Mundi Prensa Libros S. A.

Najar, T. (2012). *Evaluación de la eficiencia en la producción de compost convencional con la aplicación de la tecnología EM (microorganismos eficaces) a partir de los residuos orgánicos municipales, Carhuaz, 2012*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

Nakasaki, K., Nag, K., & Karita, S. (2005). Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. *Waste Management and Research*, *23*(1), 48–56. https://doi.org/10.1177/0734242X05049771

Nico, A. I. (2002). El empleo de enmiendas orgánicas para el control de hongos de suelo y nemátodos. En *Agroecología: El camino hacia una agricultura sustentable* (pp. 319–327). La Plata: Ediciones Científicas Latinoamericanas.

Nogales, R. (1993). *Efecto residual de los composts de RSU sobre el sistema suelo-planta. Curso sobre tratamiento de residuos urbanos*.

OEFA. (2016a). *Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos de Gestión Municipal Provincial. Informe 2014-2015*. Lima.

OEFA. (2016b). *Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos de gestión municipal provincial*.

Osorno Henao, H. (2012). *MITOS Y REALIDADES DE LAS CALES Y ENMIENDAS EN COLOMBIA*.

Pierantozzi, P., Zampini, C., Torres, M., Isla, M. I., Verdenelli, R. A., Meriles, J. M., & Maestri, D. (2012). Physico-chemical and toxicological assessment of liquid wastes from olive processing-related industries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *92*(2), 216–223. https://doi.org/10.1002/jsfa.4562

Popov, A. (2008). The probable mechanism of biological effect of humic substances. En I. Perminova & N. Kulikova (Eds.), *From molecular understanding to innovative applications of humic substances* (pp. 453–456). Moscow.

Prieto, C. (2003). *Basuras: Manejo y transformación práctico - económico*. (Ecoe Ediciones, Ed.).

Puerta Echeverri, S. M. (2004). Los residuos solidos urbanos como acondicionadores de suelos. *Revista Lasallista de Investigación*, *1*(1). Recuperado de http://www.redalyc.org/html/695/69511009/

Quevedo Beltrán, M. A. (2017). *USO DE MATERIALES DE SOPORTE EN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS VEGETALES DE MERCADO*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Quintero, E., & Alonso, A. (2007). *Ecología agrícola*.

Richard, T. L. (1992). Municipal solid waste composting: Physical and biological processing. *Biomass and Bioenergy*, *3*(3–4), 163–180. https://doi.org/10.1016/0961-9534(92)90024-K

Röben, E. (2002). Manual de Compostaje Para Municipios. *Ilustre Municipio de Loja*, 68. Recuperado de www.ded.org.ec

Rosal, A., Pérez, J. P., Arcos, M. A., & Dios, M. (2007). La Incidencia de Metales Pesados en Compost de Residuos Sólidos Urbanos y en su uso Agronómico en España. *Información Tecnológica*, *18*(6), 75–82. https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000600010

SAGARPA. Humus de lombriz (lombricompostaje) - Especificaciones y métodos de prueba, Pub. L. No. NMX-FF-109-SCFI-2007 (2007).

Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Paredes, C., & Bernal, M. P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the {Rutgers} system and its effects on {pH}, {EC} and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, *78*, 301–308.

Santos, A. (2015). Abonos orgánicos. *Sistema de Agronegocios Agricolas*, 1–7. Recuperado de http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Abonos organicos.pdf

SCHULZE, K. L. (1962). Continuous thermophilic composting. *Applied microbiology*, *10*, 108–122. Recuperado de http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13909559%0Ahttp://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC1057822

Silva, J. P., López, P., & Valencia, P. (2015). Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. *Escuela de Ingeniería Recursos Naturales y el Ambiente (EIDENAR).*, 1–25. Recuperado de http://www.ingenieroambiental.com/4014/compostaje.pdf

Soliva, M. (2001). Compostaje y residuos orgánicos. *Estudios y monografía N° 21*.

Soliva, M. (2011). Materia orgánica y compostaje. control de la calidad y del proceso. *Articulo*, 1–19. Recuperado de http://biomusa.net/es/jornadas-y-actividades/jornada-tecnica-sobre-calidad-y-fertilidad-del-suelo/70-materia-organica-y-compostaje-control-de-la-calidad-y-del-proceso/file

Soliva, M., & López, M. (2004). Calidad del compost : Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. *Formación de técnicos para el tratamiento y gestión de lodos de depuradora. Valsaín CENEAM/MIMAM 1*, 1–20.

Solivá, M., López, M., & Huerta, O. (2007). Antecedentes y fundamentos del compostaje. En *Compostaje* (pp. 75–92). Recuperado de https://books.google.com.co/books?id=APuzwas6rrcC&pg=PA121&lpg=PA121&dq=factores+que+condicionan+el+compostaje&source=bl&ots=BQUvJ4ssW5&sig=gNGQ9z7Gkji-hB3H4XTAPeCxCfU&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjuiNrm--7PAhWDSiYKHfAKCDw4ChDoAQgsMAM#v=onepage&q=factores qu

Soto, G., & Meléndez, G. (2004). Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos. *Manejo Integral de Plagas y Agroecología*, (72), 91–97. Recuperado de http://163.178.170.21/bitstream/handle/10669/318/A1909E.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Standards Australia. (2012). Compost, soil conditioners and mulches. Australian Standard 4454-2012.

Stevenson, F. J. (1994). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. (John Wiley & Sons, Ed.). https://doi.org/10.1021/ed072pA93.6

Sullivan, D., & Miller, R. (2001). Compost Quality Attributes, Measurements, and Variability. En *Compost utilization in horticultural cropping systems.*

Sundberg, C., Smårs, S., & Jönsson, H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technology*, *95*(2), 145–150. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.016

Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y., & Hodgkiss, I. J. (1996). Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, *93*(3), 249–256. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00052-8

Tobón, B., Avalos, A., & Castañon, V. (2004). *Medio Ambiente y basura*. (Editorial Creart Impresores, Ed.). La Paz - Bolivia.

Tojar, L., Escoín, V., Ingelmo, F., Molina, M. J., García-Agustin, P., & Lapeña, L. (2008). Estudio del efecto de la adición de compost sobre el cultivo de tomate (Solanum lycopersium var. montecarlo).

Tomati, U., Madejon, E., & Galli, E. (2000). Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Science and Utilization*, *8*(2), 108–115. https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701756

Uribe Hernández, R. (2008). Ensayos de inhibición de la germinación y del alargamiento radicular en semillas de cebolla (Allium cepa) y Soya (Glycine max). En *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México* (pp. 285–290). Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

US Department of Agriculture and US Composting Council. (2001). *Test methods for the examination of composting and compost*. *Rokonkoma, NY*. Recuperado de http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Test+Method+s+for+the+Examination+of+Composting+and+Compost#0

Vargas, M. del C., & Suárez, F. (2008). Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades biológicas del suelo. En *Compostaje* (pp. 330–350).

Varnero, M. T., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). Phytotoxicity indices of organic residues during composting. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, *7*(1), 28–37. https://doi.org/10.4067/S0718-27912007000100003

Vázquez, M. A., Sen, R., & Soto, M. (2015). Physico-chemical and biological characteristics of compost from decentralised composting programmes. *Bioresource Technology*, *198*, 520–532. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.034

Warman, P. R. (1999). Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity. *Compost Science and Utilization*, *7*(3), 33–37. https://doi.org/10.1080/1065657X.1999.10701972

Wolkowski, R. P. (2003). Nitrogen management considerations for landspreading municipal solid waste compost. *Journal of Environmental Quality*, *32*(5), 1844–1850. https://doi.org/10.2134/jeq2003.1844

Wong, M. H. (1985). Phytotoxicity of refuse compost during the process of maturation. *Environmental Pollution. Series A, Ecological and Biological*, *37*(2), 159–174. https://doi.org/10.1016/0143-1471(85)90006-6

WRAP. (2011). Good practice guide for the use of BSI PAS 100 compost in landscape and regeneration.

Ytavclerh, C. (2017). *Calidad del compost producido a partir de residuos sólidos orgánicos municipales en el centro de protección ambiental "Santa Cruz", ciudad de Concepción*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ. Recuperado de http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4025/Valle Muñoz.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zhu, N. (2006). Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Bioresource technology*, *97*(15), 1870–1875. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.08.011

Zubillaga, M. S., Branzini, A., & Lavado, R. S. (2008). Problemas de fitotoxicidad en compost. *Pilquen - Sección Agronomía*, (9), 1–9. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3360572#?

Zucconi, F., & De Bertoldi, M. (1987). Specifications for solid waste compost. *Biocycle*, *28*(5/6), 56–61.

Zucconi, F., Monaco, A., & Forte, M. (1985). Phytotoxins During the Stabilization of Organic Matter. *Composting of Agricultural and Other Wastes*, 73–85.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & De Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle*, *22*(2), 54–57. https://doi.org/216.54.119.118

ANEXOS

ANEXO 1

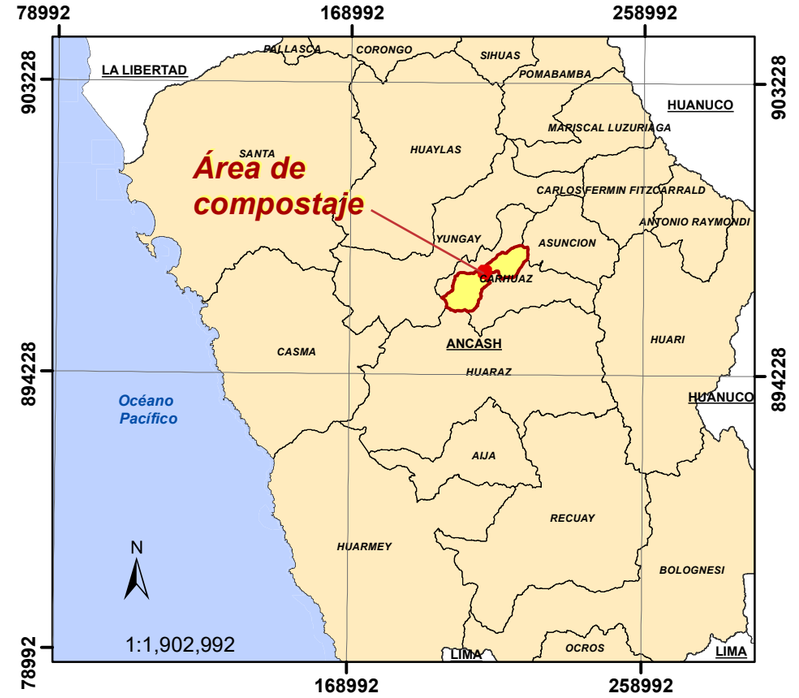
UBICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CARHUAZ

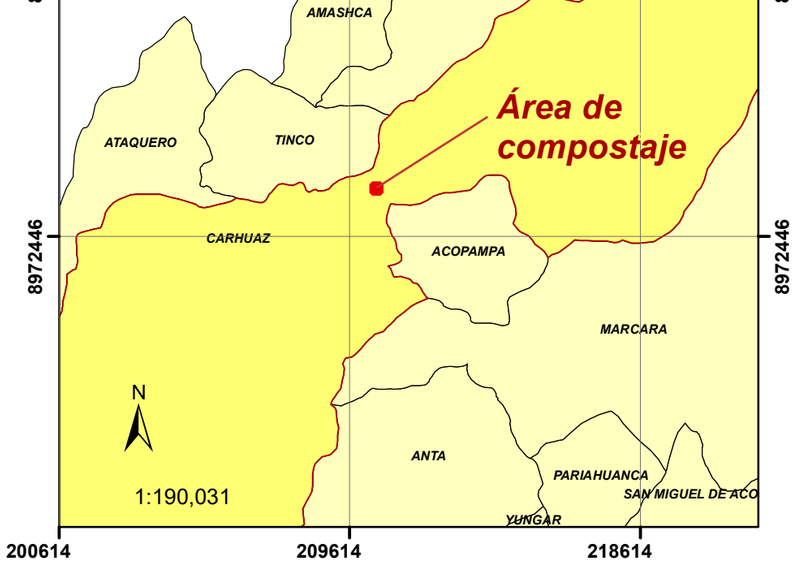
ÁREA DE COMPOSTAJE		
COORDENADAS WGS84 - UTM	ESTE	NORTE
	210448	8973946

210000
211200
8974000
3100
3150
3000
2900
2850
2800
2750
Uranhuay
Cajamarquilla
N
0 40 80 160 240 320 400 Meters

LEYENDA

- Planta de tratamiento de Residuos Sólidos
- Área de compostaje
- Centro poblado
- Curva de nivel





UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: "DETERMINACIÓN DE LA FITOTOXICIDAD DEL COMPOST DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CARHUAZ, UTILIZANDO EL CULTIVO DE TRIGO COMO INDICADOR, CARHUAZ - ANCASH, 2017"

MAPA:
UBICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CARHUAZ

DEPARTAMENTO: ÁNCASH **PROVINCIA:** CARHUAZ **DISTRITO:** CARHUAZ

DATUM: WGS84 – UTM Z18S **ESCALA:** 1:10,000

ANEXO 2

FORMULARIO PARA LA EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO Y EL ESTADO DE UNA PLANTA DE COMPOSTAJE

FORMULARIO PARA EVALUAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA												
NOMBRE DE LA PLANTA												
PERSONAL DE CONTACTO												
TELÉFONO DE CONTACTO												
E-MAIL												
POBLACIÓN												
FECHA DE LA VISITA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
SUPERFICIE TOTAL DE LA PLANTA												
SUPERFICIE OCUPADA												
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO (t/año)												
LOCALIDADES BENEFICIARIAS												

2. MATERIALES DE ENTRADA	t/día	t/año
☐ RESTOS VEGETALES		
☐ FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS MUNICIPALES		
☐ RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS		
☐ LODOS DE PTAR		
☐ LODOS DE INDUSTRIA ALIMENTARIA		
☐ OTROS		
Total de materiales tratados al año (t)		

3. PRODUCCIÓN DE COMPOST	
PRODUCCIÓN TOTAL (t/año)	
RENDIMIENTO (t Compost/t material tratado)	
t de COMPOST VENDIDO AL AÑO	

DESTINO DEL COMPOST	☐ JARDINERÍA ☐ AGRICULTURA ☐ RESTAURACIÓN ☐ JARDINERÍA / AGRICULTURA / RESTAURACIÓN ☐ JARDINERÍA / AGRICULTURA ☐ AGRICULTURA / RESTAURACIÓN ☐ SIN COMERCIALIZAR

4. CONSUMO

AGUA		**m^3/año**
LUZ		**KWh/año**
COMBUSTIBLE		**m^3/año**

5. PERSONAL
(Observaciones)

¿Personal suficiente?	Motivación:	Preparación:
☐ Sí ☐ No	☐ Muy buena ☐ Buena ☐ Regular ☐ Baja ☐ Muy baja	☐ Muy buena ☐ Buena ☐ Regular ☐ Baja ☐ Muy baja

6. RESTOS VEGETALES

¿Trituradora?	Tamaño de triturado:	Observaciones:
☐ Sí ☐ No		

Proporción (%) en volumen de restos vegetales incluidos en la mezcla inicial:

Proporción mínima: _____ %
Proporción máxima: _____ %

7. ETAPA DE DESCOMPOSICIÓN

Realizada en:	Dimensiones (m):			Sistema:
	Ancho	Largo	Alto	
☐ Túneles ☐ Pilas Número: ____				☐ Aspiración ☐ Impulsión

Duración de la etapa de descomposición:	Frecuencia de riego:	Frecuencia de volteo:
Periodo mínimo: ___ días Periodo Máximo: ___ días	Periodo mínimo: ___ días Periodo Máximo: ___ días	Periodo mínimo: ___ días Periodo Máximo: ___ días

8. ETAPA DE MADURACIÓN

Realizada en:	Dimensiones (m):			Sistema:
	Ancho	Largo	Alto	
☐ Túneles ☐ Pilas Número: _____				☐ Aspiración ☐ Impulsión

Duración de la etapa de maduración:	**Frecuencia de riego:**	**Frecuencia de volteo:**
Periodo mínimo: ___ días Periodo Máximo: ___ días	Periodo mínimo: ___ días Periodo Máximo: ___ días	Periodo mínimo: ___ días Periodo Máximo: ___ días

9. LIXIVIADOS

¿Dónde se almacenan?	**Recirculación:**	**Periodo de utilización de lixiviados:**
☐ Depósito abierto ☐ Depósito cerrado	☐ Sí ☐ No	☐ Durante toda la descomposición ☐ Durante toda la maduración ☐ Inicio de descomposición ☐ Inicio de maduración ☐ Fin de maduración
Recogida de agua pluvial:		
☐ Sí ☐ No		

10. IMPUREZAS

Cantidad de impurezas retiradas: _____ t/año	
Impurezas mayoritarias:	Huesos, trozos de madera, piedras, tallos gruesos no degradados.
Destino de las impurezas:	Acumulación en cerco perimétrico de la planta

11. SEPARACIÓN DE IMPUREZAS

Se hace:		**t/año**	**Mecanismo**	**Impureza mayoritaria**
☐ Inicio	☐ Manual ☐ Mecánica			
☐ Final descomposición	☐ Manual ☐ Mecánica			
☐ Final maduración	☐ Manual ☐ Mecánica			
☐ Afino	☐ Manual ☐ Mecánica			

FORMULARIO PARA EVALUAR EL ESTADO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA												
NOMBRE DE LA PLANTA												
PERSONAL DE CONTACTO												
TELÉFONO DE CONTACTO												
E-MAIL												
POBLACIÓN												
FECHA DE LA VISITA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic

2. IMPRESIÓN INICIAL DE LA PLANTA	Alto	Medio	Bajo
Facilidad para fijar la fecha de visita	☐	☐	☐
Control de entrada a planta	☐	☐	☐
Atención en la visita:			
☐ Operario	☐	☐	☐
☐ Encargado	☐	☐	☐
☐ Responsable de gestión	☐	☐	☐
Facilidad para mostrar la planta	☐	☐	☐
Facilidad para escoger el material	☐	☐	☐

3. VALORACIÓN DEL ESTADO DE LA PLANTA	Alto	medio	Bajo
Orden y limpieza de la planta	☐	☐	☐
Lixiviados			
Nivel del contenedor (Alto: muy llenas; Bajo: vacías)	☐	☐	☐
Presencia en el suelo de la planta:			
Descomposición ☐ Ausente	☐	☐	☐
Maduración ☐ Ausente	☐	☐	☐
Final ☐ Ausente	☐	☐	☐
Obturación de los canales recolectores	☐	☐	☐
Estado de la maquinaria			
Funcionalidad en general	☐	☐	☐
Observaciones (Tipo de maquinaria / función)			
Presencia de polvo			
En general ☐ Ausente	☐	☐	☐

Descomposición ☐ Ausente	☐	☐	☐
Maduración ☐ Ausente	☐	☐	☐
Final ☐ Ausente	☐	☐	☐
Humedad de las pilas (Alto: muy húmedas; Bajo: secas)			
Descomposición	☐	☐	☐
Maduración	☐	☐	☐
Final	☐	☐	☐
Olor			
General	☐	☐	☐
Descomposición	☐	☐	☐
Maduración	☐	☐	☐
Final	☐	☐	☐

4. PERSONAL DE LA PLANTA – ÁREA DE COMPOSTAJE

Cargo	Número de trabajadores
☐ Jefe de planta	
☐ Operario	
☐ Mantenimiento	
☐ Comercio	

5. OBSERVACIONES ADICIONALES

_____
_____
_____
_____
_____
_____

ANEXO 3

VALORES DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y pH REGISTRADOS DURANTE EL MONITOREO DE PILAS DE COMPOSTAJE

VALORES DE TEMPERATURA:

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Actividad							**1° Volteo**			
Pila de compostaje / Fecha de monitoreo	**02/11/2017**	**09/11/2017**	**16/11/2017**	**23/11/2017**	**30/11/2017**	**07/12/2017**	**14/12/2017**	**21/12/2017**	**28/12/2017**	**04/01/2018**
Pila N° 01	31.2	40.9	42.3	46.11	54.17	59.6	45.00	54.40	55.51	60.40
Pila N° 02		36.5	45.2	52.33	58.33	56.2	46.50	51.60	50.20	53.40
Pila N° 03			38.6	49.11	59.00	51.8	43.00	52.60	53.60	58.80
Pila N° 04				36.44	49.50	54.4	42.00	53.20	52.10	54.20
Media de temperatura				**46.00**	**55.25**	**55.50**	**44.13**	**52.95**	**52.85**	**56.70**

Semana	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Actividad	**2° Volteo**				**3° Volteo**				**4° Volteo**
Pila de compostaje / Fecha de monitoreo	**11/01/2018**	**18/01/2018**	**25/01/2018**	**01/02/2018**	**08/02/2018**	**15/02/2018**	**22/02/2018**	**01/03/2018**	**08/03/2018**
Pila N° 01	46.20	54.90	56.50	60.20	52.40	55.44	58.00	62.10	46.40
Pila N° 02	44.00	51.60	54.30	57.61	50.10	53.61	55.40	59.60	43.00
Pila N° 03	45.20	53.70	54.80	58.30	45.80	55.61	57.30	60.10	45.20
Pila N° 04	43.80	52.30	49.80	56.30	55.10	49.78	52.60	57.20	47.50
Media de temperatura	**44.80**	**53.13**	**53.85**	**58.10**	**50.85**	**53.61**	**55.83**	**59.75**	**45.53**

Semana	20	21	22	23	24
Actividad	**MADURACIÓN**				
Pila de compostaje / Fecha de monitoreo	**15/03/2018**	**22/03/2018**	**29/03/2018**	**05/04/2018**	**08/04/2018**
Pila N° 01	40.60	32.50	27.60	24.60	**COSECHA Y MUESTREO**
Pila N° 02	37.20	28.70	24.20	21.20	
Pila N° 03	39.40	30.20	25.00	23.30	
Pila N° 04	36.50	26.90	24.30	20.60	
Media de temperatura	**38.43**	**29.58**	**25.28**	**22.43**	

VALORES DE HUMEDAD:

Pila de compostaje/Fecha de monitoreo	23/11/2017	14/12/2017	11/01/2018	08/02/2018	08/03/2018	29/03/2018
Pila N° 01	71.4	62.95	59.45	57.02	50.13	36.59
Pila N° 02	72.66	64.52	63.35	59.06	52.81	35.31
Pila N° 03	66.89	64.07	63.64	58.11	52.5	37.3
Pila N° 04	75.09	66.14	61.81	57.13	55.76	40.38

VALORES DE pH:

Pila de compostaje/Fecha de monitoreo	14/12/2017	11/01/2018	08/02/2018	08/03/2018
Pila N° 01	5.3	7.3	8.7	8.1
Pila N° 02	5.6	7.6	9	8.4
Pila N° 03	5.1	7.5	8.8	8.2
Pila N° 04	5	7.8	9	8.5

ANEXO 4

INFORME DE ANÁLISIS DE SUELO - FERTILIDAD

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

INFORME DE ANALISIS DE SUELO - FERTILIDAD

SOLICITANTE : ANTONY L. PACCINI SANCHEZ

PROCEDENCIA : ANCASH/ CARHUAZ

REFERENCIA : H.R. 62393

FECHA : 08/02/2018

Número Muestra		pH	$CE_{(1:1)}$	$CaCO_3$	M.O.	P	K	$Al^{+3} + H^+$
Lab	Claves	(1:1)	dS/m	%	%	ppm	ppm	meq/100
076	MS-01	6.90	0.38	0.00	3.31	60.4	271	0.00

Número Muestra		N
Lab	Claves	%
076	MS-01	0.20

Lab. Análisis de Suelos, Aguas y Foliares · LASPAF · UNALM

Dr. Sady García Bendezú
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 5

INFORME DE ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA

PARA EL COMPOST EXISTENTE:

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

INFORME DE ANALISIS DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE	:	ANTHONY LUISIN PACCINI SANCHEZ
PROCEDENCIA	:	ANCASH/ CARHUAZ
MUESTRA DE	:	COMPOST
REFERENCIA	:	H.R. 61134
BOLETA	:	943
FECHA	:	03/11/17

Nº LAB	CLAVES	pH	C.E. dS/m	M.O. %	N %	P_2O_5 %	K_2O %
775	MCI-01	7.57	8.44	24.16	1.13	0.10	1.10

Nº LAB	CLAVES	CaO %	MgO %	Hd %	Na %
775	MCI-01	5.32	0.69	20.13	0.12

Nº LAB	CLAVES	Acido Húmico %	Acido Fúlvico %	Humina %	C Orgánico %	Relación C/N	Densidad g/cc
775	MCI-01	3.35	1.37	15.30	11.61	10.27	0.66

Nº LAB	CLAVES	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm	Máx. Ret. Hd. %	Impureza %
775	MCI-01	64.50	2.13	24.13	49.21	53.87

Lab. Análisis de Suelos, Aguas y Plantas LASPAF UNALM

Dr. Sády García Bendezú
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA

LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ANALISIS MICROBIOLÓGICO

POBLACIÒN MICROBIANA

SOLICITANTE : ANTHONY LUISIN PACCINI SANCHEZ

MUESTRA DE : COMPOST

PROCEDENCIA: ANCASH/ CARHUAZ

REFERENCIA : 61135

BOLETA : 943

FECHA : 15/11/2017

Código de muestra	Código de Campo	Humedad gravim (%)	Organismos mesófilos totales (UFC/ g compost seco)		
			Bacterias	Actinomicetos	Hongos
219	MC1-02	24.53	6.90×10^6	8.30×10^5	1.97×10^5

UFC : Unidad formadora de colonia

Lab. Análisis de Suelos, Agua y Plantas LASPAF UNALM

Dr. Sady García Bendezú
Jefe de Laboratorio de Microbiología

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

PARA EL COMPOST FRESCO:

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

INFORME DE ANALISIS DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE : ANTHONY LUISIN PACCINI SANCHEZ

PROCEDENCIA : ANCASH/ CARHUAZ/ CARHUAZ

MUESTRA DE : COMPOST

REFERENCIA : H.R. 63036

BOLETA : 1429

FECHA : 18/04/18

Nº LAB	CLAVES	pH	C.E. dS/m	M.O. %	N %	P_2O_5 %	K_2O %
255	MC2-01	7.91	9.58	33.41	1.51	1.51	2.46

Nº LAB	CLAVES	CaO %	MgO %	Hd %	Na %
255	MC2-01	6.78	0.87	34.25	0.32

Nº LAB	CLAVES	Acidos Fúlvicos %	Acidos Húmicos %	Huminas %	Impureza %	Relación C/N
255	MC2-01	1.35	3.94	23.23	48.56	10.95

Nº LAB	CLAVES	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm	C %	Densidad g/cc
255	MC2-01	50.44	3.34	22.54	16.54	0.55

Lab. Análisis de Suelos, Aguas y Plantas · LASPAF · UNALM

Dr. Sady García Bendezú
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Av. La Molina s/n La Molina - Lima - Perú
Teléfono: 6147800 anexo 274

INFORME DE ENSAYO Nº 1804113 - LMT

SOLICITANTE : ANTHONY LUISIN PACCINI SANCHEZ

DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO

MUESTRA : COMPOST TERMINADO
1804113)

PROCEDENCIA	:Carhuaz - Ancash
TIPO DE ENVASE	: Bolsa de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA	: 01 muestra x 01 und. x 900 g. aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN	: En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO	: 2018 - 04 - 08
FECHA DE RECEPCIÓN	: 2018 - 04 - 09
FECHA DE INICIO DE ENSAYO	: 2018 - 04 - 09
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	: 2018 - 04 - 16

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA

Análisis Microbiológico	Muestra 1804113
[1]Recuento de mohos y levaduras (UFC/g)	93×10^3
[1]Enumeración de coliformes totales (NMP/g)	46 x 10
[1]Enumeración de coliformes fecales (NMP/g)	46 x 10
[1]Enumeración de *Escherichia coli* (NMP/g)	40
[1]Detección de *Salmonella sp.* en 25 g.	Ausencia
[2]Recuento de actinomicetos (UFC/g)	15×10^4

Métodos:

[1]International Commission on Microbiological Specifications for Foods. 1983. 2da Ed. Vol 1 Part II, (Trad. 1988) Reimp. 2000. Editorial Acribia.

[2]American Public Health Association. 1992. Compendium of methods for the Microbiological Examination of foods. 3rd Ed. Chapter 13.

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio en muestras proporcionadas por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento:

Este documento tiene validez sólo para la muestra descrita.

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA — Universidad Nacional Agraria La Molina — MARINO TABUSSO — Lab. Ecología Microbiana y Biotecnología

La Molina, 18 de abril de 2018

DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA

Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana
y Biotecnología "Marino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina

Teléfono: 6147800 anexo 274
E-mail: lmt@lamolina.edu.pe

ANEXO 6

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS BIOLÓGICOS

VALORES REGISTRADOS PARA EL ENSAYO DE GERMINACIÓN

	TRATAMIENTOS	N° DE SEMILLAS GERMINADAS	ELONGACIÓN RADICULAR (mm)										
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	PROM
Testigo	**T0**	10	81.50	79.80	85.10	74.70	69.10	80.90	80.80	86.10	80.30	84.50	**80.28**
C. Existente	**T1R1**	10	59.40	55.10	52.40	48.80	57.40	35.50	41.10	42.50	46.50	32.10	**47.08**
	T1R2	9	59.40	50.00	54.30	55.30	40.90	40.50	54.00	28.40	15.70	0.00	**44.28**
	T1R3	10	47.80	48.40	52.10	60.10	53.90	55.00	51.30	34.40	24.80	6.60	**43.44**
	T1R4	10	45.30	38.90	46.00	40.20	47.10	54.50	52.60	39.00	66.40	47.10	**47.71**
C. Fresco	**T2R1**	9	67.30	52.50	55.70	46.00	53.20	51.30	46.80	53.30	51.80	0.00	**53.10**
	T2R2	9	54.90	55.00	59.00	53.20	47.60	55.00	56.70	41.00	43.80	0.00	**51.80**
	T2R3	10	56.70	66.90	57.40	54.80	54.40	65.50	59.70	61.20	50.90	56.50	**58.40**
	T2R4	10	47.00	59.90	56.30	47.80	62.70	58.30	56.40	57.20	59.30	50.30	**55.52**

VALORES REGISTRADOS PARA EL ENSAYO DE SIEMBRA DIRECTA

		COMPOST FRESCO		COMPOST EXISTENTE	
	CÓDIGO	N° TALLOS	PESO (g)	N° TALLOS	PESO (g)
COMPOST 0% - TESTIGO	T0R1	40	4.9230	40	5.1700
	T0R2	39	5.0200	40	5.0270
	T0R3	40	5.8100	40	5.3339
	T0R4	37	3.8719	40	5.7328
	PROM	**39**	**4.9062**	**40**	**5.3159**
COMPOST 15% - T1	T1R1	38	5.8135	40	6.4710
	T1R2	39	5.2160	40	6.7900
	T1R3	39	5.1311	40	6.1100
	T1R4	35	4.4830	39	5.5413
	PROM	**37.75**	**5.1609**	**39.75**	**6.2281**
COMPOST 30% - T2	T2R1	35	4.0349	34	3.0953
	T2R2	39	4.8356	32	2.8716
	T2R3	39	4.9173	30	2.4860
	T2R4	39	4.9936	33	3.5845
	PROM	**38**	**4.6954**	**32.25**	**3.0094**
COMPOST 45% - T3	T3R1	39	3.6400	27	0.8157
	T3R2	38	3.2920	9	0.4962
	T3R3	40	4.3754	10	0.5549
	T3R4	37	3.4150	23	1.3016
	PROM	**39**	**3.6806**	**17**	**0.7921**

VALORES REGISTRADOS PARA EL ENSAYO DE CULTIVO DE PLANTAS

TRATAMIENTOS EN COMPOST FRESCO		N° DE PLANTAS	ALTURA PROMEDIO DE LA PLANTA	PESO FRESCO
BLANCO	T0R1	28	55.75	33.7684
	T0R2	35	58.75	46.1374
	T0R3	37	54.50	44.0412
	T0R4	39	52.25	43.3353
25% C	T1R1	39	46.50	70.2237
	T1R2	39	48.75	67.7302
	T1R3	39	53.67	71.9717
	T1R4	40	59.00	75.8896
50% C	T2R1	39	44.50	67.4739
	T2R2	39	50.75	67.2057
	T2R3	40	44.00	65.6577
	T2R4	37	48.33	65.4597
75% C	T3R1	40	47.00	57.8054
	T3R2	37	44.00	62.3467
	T3R3	37	46.33	59.4338
	T3R4	40	43.50	63.8332

TRATAMIENTOS EN COMPOST EXISTENTE		N° DE PLANTAS	ALTURA PROMEDIO DE LA PLANTA	PESO FRESCO
BLANCO	T0R1	28	55.75	33.7684
	T0R2	35	58.75	46.1374
	T0R3	37	54.50	44.0412
	T0R4	39	52.25	43.3353
25% C	T1R1	40	42.33	31.0976
	T1R2	40	37.50	32.3867
	T1R3	40	38.00	35.1343
	T1R4	40	49.00	32.1221
50% C	T2R1	38	39.00	30.4556
	T2R2	36	37.00	29.2291
	T2R3	39	44.67	30.2426
	T2R4	30	34.50	29.5083
75% C	T3R1	31	35.33	18.1562
	T3R2	36	30.67	18.9658
	T3R3	33	36.25	25.1665
	T3R4	31	30.67	24.6095

ANEXO 7

COMPARACIÓN DE MEDIAS MEDIANTE LA PRUEBA DE TUKEY PARA LOS ENSAYOS BIOLÓGICOS

PRUEBA DE TUKEY PARA EL TEST DE ZUCCONI – ÍNDICE DE GERMINACIÓN

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
IG	8	0.45	0.36	9.99

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	177.57	1	177.57	4.91	0.0685
TRAT	177.57	1	177.57	4.91	0.0685
Error	216.82	6	36.14		
Total	394.39	7			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=10.40110

Error: 36.1370 gl: 6

TRAT	Medias	n	E.E.	
CE	55.46	4	3.01	A
CF	64.88	4	3.01	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

PRUEBA DE TUKEY PARA LA SIEMBRA DIRECTA

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Biomasa (%)	24	0.95	0.93	12.10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28128.51	5	5625.70	64.08	<0.0001
Tratamientos	28128.51	5	5625.70	64.08	<0.0001
Error	1580.28	18	87.79		
Total	29708.78	23			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=21.05591

Error: 87.7931 gl: 18

Tratamientos	Medias	n	E.E.						
E_15%	117.16	4	4.68	A					
F_15%	105.19	4	4.68	A	B				
F_30%	95.70	4	4.68		B	C			
F_45%	75.02	4	4.68			C	D		
E_30%	56.61	4	4.68				D		
E_45%	14.90	4	4.68						E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

PRUEBA DE TUKEY PARA EL CULTIVO DE PLANTAS

A. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE MEZCLA FRESCA

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Rendimiento de la mezcla	24	0.99	0.98	5.27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	52731.41	5	10546.28	297.96	<0.0001
Tratamiento	52731.41	5	10546.28	297.96	<0.0001
Error	637.11	18	35.39		
Total	53368.52	23			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=13.36946

Error: 35.3949 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
F25	170.86	4	2.97	A			
F50	158.89	4	2.97	A			
F75	145.51	4	2.97		B		
E25	78.16	4	2.97			C	
E50	71.40	4	2.97			C	
E75	51.95	4	2.97				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

B. ANÁLISIS DEL N° SEMILLAS GERMINADAS A LOS 7 DÍAS

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
N° semillas germinadas a l..	24	0.92	0.90	16.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2200.38	5	440.08	42.08	<0.0001
Tratamiento	2200.38	5	440.08	42.08	<0.0001
Error	188.25	18	10.46		
Total	2388.63	23			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=7.26733

Error: 10.4583 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
F25	35.00	4	1.62	A		
F50	29.25	4	1.62	A		
E25	19.00	4	1.62		B	
F75	18.75	4	1.62		B	
E50	11.75	4	1.62		B	C
E75	7.00	4	1.62			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

C. ANÁLISIS DEL NÚMERO DE PLANTAS AL TÉRMINO DEL ESTUDIO

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
N° plantas	24	0.65	0.56	5.62

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	150.00	5	30.00	6.75	0.0010
Tratamiento	150.00	5	30.00	6.75	0.0010
Error	80.00	18	4.44		
Total	230.00	23			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=4.73753

Error: 4.4444 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
E25	40.00	4	1.05	A	
F25	39.25	4	1.05	A	
F50	38.75	4	1.05	A	
F75	38.50	4	1.05	A	
E50	35.75	4	1.05	A	B
E75	32.75	4	1.05		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

D. ANÁLISIS DE LA ALTURA MEDIA ALCANZADA POR LAS PLANTAS

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Altura media (cm)	24	0.74	0.67	9.51

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	862.02	5	172.40	10.33	0.0001
Tratamiento	862.02	5	172.40	10.33	0.0001
Error	300.36	18	16.69		
Total	1162.39	23			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=9.17977

Error: 16.6869 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
F25	51.98	4	2.04	A		
F50	46.90	4	2.04	A	B	
F75	45.21	4	2.04	A	B	
E25	41.71	4	2.04		B	C
E50	38.79	4	2.04		B	C
E75	33.23	4	2.04			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

ANEXO 8

PANEL FOTOGRÁFICO

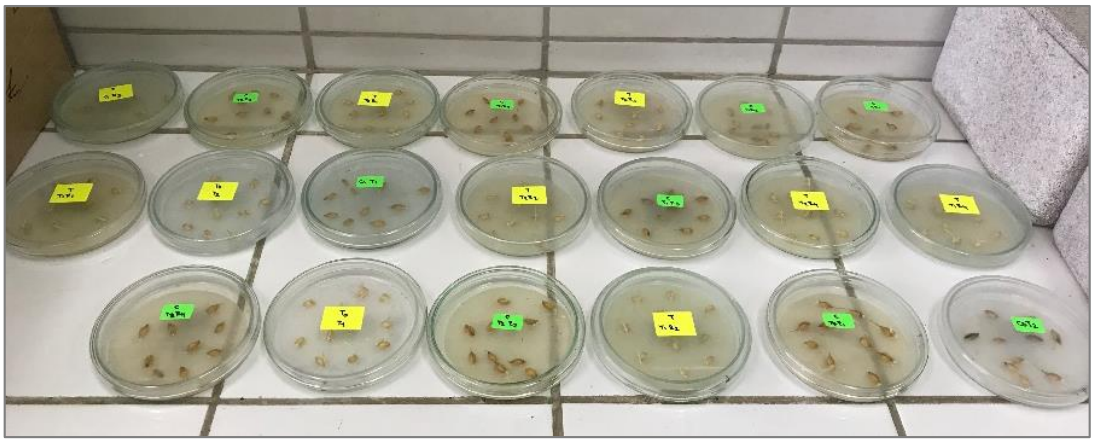
A

B

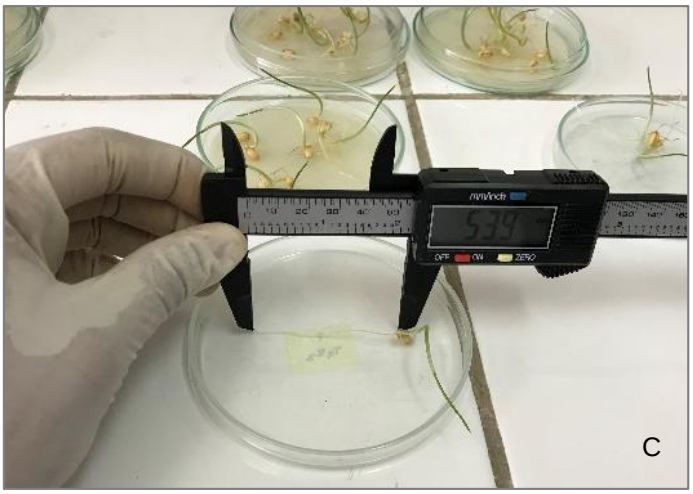
C

Fotografías: A, B: Monitoreo de parámetros en las pilas de compostaje. C: Distribución de pilas de compostaje durante la investigación

A



B

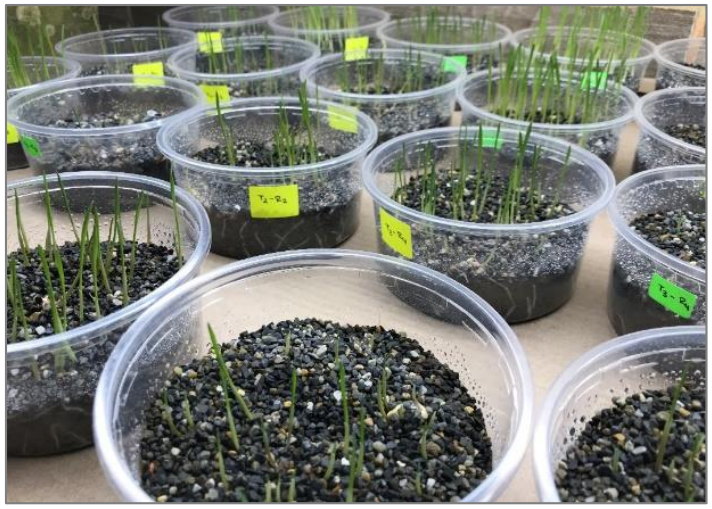


C

D

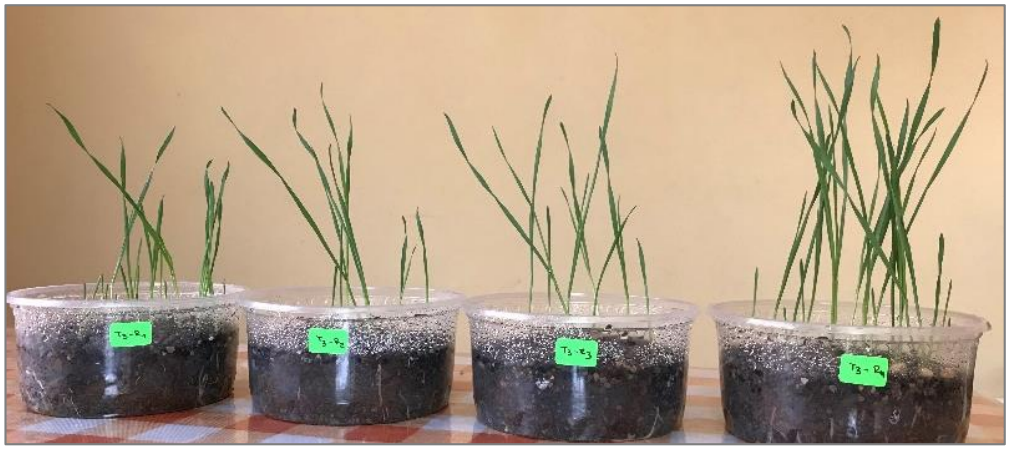
Fotografías: A: Prueba de germinación de semillas. B: Inhibición en el desarrollo radicular. C: Medición de la elongación radicular. D: Desarrollo radicular en el testigo.

A



B

C



D

Fotografías: A: Prueba de siembra directa. B: Diferencias entre la biomasa generada por un tratamiento al 45% de compost fresco (izquierda) y un testigo (derecha) al término del ensayo. C: Inhibición del desarrollo de las plantas en tratamientos con compost existente al 45%, al término del ensayo. D: Desarrollo de las plantas en el testigo al término del ensayo.

A

B

C

D

E

Fotografías: A, B: Prueba de cultivo en maceta. C: Plantas de trigo desarrolladas en el testigo, al término del ensayo. D: Tratamiento con 50% compost fresco. E: Tratamiento con 50% compost existente