

Universidad Nacional
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar
Escuela de Ciencias Ambientales

Título:

Propuesta para el Tratamiento de los Residuos Orgánicos Domiciliarios y Comerciales para el distrito de Guápiles en el marco del Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos del cantón de Pococí, Limón, Costa Rica, período 2021-2023

Trabajo Final de Graduación para obtener el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental

Modalidad:

Proyecto de Graduación

Autora:

Celine Fabiola Salazar González

Comité asesor:

Tutora: M.Sc. Alina Aguilar Arguedas

Lector: Lic. Fabián Delgado Villalobos

Lectora: Dra. Vanessa Valerio Hernández

Heredia, Costa Rica

Diciembre, 2023

“Propuesta para el Tratamiento de los Residuos Orgánicos Domiciliarios y Comerciales para el distrito de Guápiles en el marco del Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos del cantón de Pococí, Limón, Costa Rica, período 2021-2023”, proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

M.Sc. Lilliam Arias Quirós

Decana de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar.

M.Sc. Melissa Blandón Naranjo

Directora de la Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA)

M.Sc. Alina Aguilar Arguedas

Tutora

Lic. Fabián Delgado Villalobos

Lector

Dra. Vanessa Valerio Hernández

Lectora

Bach. Celine Salazar González

Postulante

Agradecimientos

A mi familia, por estar siempre a mi lado y brindarme su apoyo incondicional. Gracias por su paciencia en mis momentos de estrés y frustración, y por creer en mí.

A la M.Sc. Alina Aguilar y la Dra. Vanessa Valerio, por acompañarme durante todo el proceso, brindándome retroalimentación y palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante.

Agradezco enormemente a la Municipalidad de Pococí por la oportunidad de realizar este proyecto en su institución. En especial, quiero expresar mi gratitud a Fabián Delgado, Ariana Solís y Alejandro Vega, es difícil explicar con palabras el agradecimiento profundo que siento hacia ustedes. Fueron un gran apoyo desde el inicio y les estaré siempre agradecida por creer en mí, por su sentido del humor y ayudarme a crecer. Son personas y profesionales increíbles a quienes admiro mucho, fue un honor trabajar con ustedes y me siento muy afortunada.

También le estoy muy agradecida al personal de Saneamiento Ambiental, cuya colaboración fue esencial durante el proceso de campo, y al estudiante del Colegio Técnico Profesional de Pococí, Royner Astorga, quien fue un gran apoyo en la realización de encuestas y recolección de muestras. Su ayuda para orientarme en Guápiles y su actitud siempre positiva alivianó el trabajo.

Al Ing. Oswaldo Páez, quien no tiene idea del gran apoyo intelectual que fue para mí. Le estoy profundamente agradecida por compartirme su conocimiento y por explicarme de manera amable, detallada y paciente todas mis dudas.

Igualmente, le agradezco al Laboratorio de Análisis Ambiental y Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliare por su apoyo con los análisis de laboratorio.

A las familias y comercios participantes, que amablemente colaboraron en el proceso de encuestas y guardaron las muestras necesarias para el estudio, sin su disposición a participar este proyecto no hubiera sido posible.

Finalmente, gracias de corazón a cada amigo, amiga y a todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso. El apoyo y colaboración recibida fue fundamental para poder culminar esta etapa.

Lista de abreviaturas

MM	Microorganismos de Montaña
C/N	Carbono/Nitrógeno
NH₃	Amoniaco
N₂O	Óxido nitroso
CO₂	Dióxido de carbono
CH₄	Metano
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ENSRVR	Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos
INDER	Instituto de Desarrollo Rural
GIR	Gestión Integral de Residuos
PMGIR	Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos
SCIJ	Sistema Costarricense de Información Jurídica
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
EC	Economía Circular
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
CYMA	Programa de Competitividad y Medio Ambiente
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental
CGR	Contraloría General de la República
SETENA	Secretaría Técnica Nacional
pH	Concentración de iones hidronio
GEI	Gases de Efecto Invernadero
PCG	Potencial de Calentamiento Global
T.a	Temperatura ambiente
kg	Kilogramo
ml	Mililitros
mg	Miligramos
°C	Grados Celsius
l	Litros
ton	Toneladas
m²	Metros cuadrados
m³	Metros cúbicos

Resumen ejecutivo

En el 2018, se identificó que en el cantón de Pococí un 58,1 % de los residuos domiciliarios y entre el 44,1 % y 67,4 % de los comerciales, eran residuos orgánicos. Ante este panorama, la Municipalidad de Pococí desarrolló un programa llamado Pococí Composta, enfocado en el compostaje descentralizado para los sectores residencial, educativo e institucional. Sin embargo, la falta de un enfoque específico para los residuos orgánicos comerciales reveló la necesidad de una solución de tratamiento más sostenible.

El objetivo de este proyecto es desarrollar una propuesta para la recolección y tratamiento de residuos orgánicos (RO) domiciliarios y comerciales en el distrito de Guápiles, Pococí. Este se dividió en tres fases: primero, se estudió la generación y disposición actual de los RO; segundo, se probaron tres variaciones de compostaje del método de pilas con volteo manual, usando diferentes activadores biológicos: Microorganismos de Montaña (T1), compost maduro (T2), compost maduro + Microorganismos de Montaña (T3), y un control sin activadores (T0); finalmente, se desarrolló una propuesta de compostaje con enfoque de economía circular basada en los resultados obtenidos.

Los hallazgos mostraron una generación per cápita de 0,30 kg/hab-día en el sector residencial y un total de 5 686,80 kg en el comercial, con las verdulerías y restaurantes como principales generadores. Se descubrió que el 75 % de los sitios usa métodos alternativos en lugar del relleno sanitario y las pruebas de compostaje indicaron que el uso de compost maduro como activador biológico fue la opción más eficiente, logrando un equilibrio óptimo de pH, relación C/N y nutrientes, además de cumplir con los límites de metales pesados según la norma NCh2880. Finalmente, la propuesta combinó métodos centralizados y descentralizados, abarcando desde la recolección hasta la comercialización del producto final.

Tabla de contenidos

I.	Introducción	12
1.1	Antecedentes	12
1.2	Problema	15
1.3	Justificación	17
II.	Objetivos	19
2.1	Objetivo general.....	19
2.2	Objetivos específicos	20
III.	Marco Teórico	20
3.1	Definición y características de los residuos orgánicos	20
3.2	Compostaje como una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos	22
3.3	Economía Circular dentro del proceso de compostaje.....	25
3.4	Técnica de compostaje de pilas con volteo	27
3.5	Parámetros fisicoquímicos importantes de monitorear durante el compostaje.....	30
IV.	Legislación	33
4.1	Normativa costarricense sobre residuos sólidos	33
4.2	Normativa chilena de calidad del compost	35
V.	Marco Conceptual	36
5.1	Enfoque de la investigación.....	36
5.2	Alcance de la investigación.....	37
5.3	Proceso metodológico	37
5.3.1	Caracterización del sitio de estudio	37
5.3.2	Fase 1: Determinación de la generación y manejo de residuos orgánicos.....	39
5.3.2.1	Obtención de información sobre viviendas y comercios	39
5.3.2.2	Determinación del número de muestras	40
5.3.2.3	Selección e identificación de los sitios de estudio	42
5.3.2.4	Recolección y pesaje de las muestras	44
5.3.2.5	Procesamiento y análisis de información.....	47
5.3.3	Fase 2: Evaluación de la viabilidad de implementación de los métodos de compostaje	48
5.3.3.1	Diseño de investigación	48

5.3.3.2	Procedimiento	51
5.3.3.2.1	Etapa pre-campo	51
	<i>Recopilación de información</i>	51
	<i>Requerimientos de materiales, insumos y equipos necesarios para las pruebas</i>	52
	<i>Cálculo de la Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)</i>	54
	<i>Acondicionamiento del área experimental</i>	58
5.3.3.2.2	Etapa de campo	59
	<i>Recolección de las muestras de residuos orgánicos</i>	59
	<i>Formación y composición de las pilas de compostaje</i>	62
	<i>Volteo y riego</i>	65
	<i>Parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso</i>	66
	<i>Periodo de maduración</i>	69
5.3.3.2.3	Evaluación del producto final	70
	<i>Resultados del laboratorio para determinar la calidad del producto final</i>	70
	<i>Determinación de la viabilidad de implementación</i>	71
5.3.4	Fase 3. Propuesta para la gestión de los residuos orgánicos	71
	<i>Elección del método de compostaje</i>	71
	<i>Contenido de la propuesta</i>	72
VI.	Resultados y discusión	73
6.1	Manejo y generación de los residuos orgánicos de viviendas y comercios	73
6.2	Pruebas de compostaje	94
6.2.1	Comportamiento de los parámetros durante el proceso de compostaje	95
6.2.1.1	Temperatura.....	95
6.2.1.2	pH (concentración de iones de hidronio)	102
6.2.2	Determinación de la calidad del producto final	106
6.2.2.1	Análisis de los resultados de laboratorio.....	106
6.2.2.2	Viabilidad de implementación.....	115
6.2.2.1	Evaluación de costos e ingresos potenciales del proyecto	115
6.3	Propuesta de compostaje municipal con enfoque en economía circular.....	123

6.3.1	Apartado 1: Preparación y planificación	124
6.3.2	Apartado 2: Diseño de planta	129
6.3.3	Apartado 3: Aspectos técnicos de operación.....	140
6.3.4	Apartado 4: Gestión y administración.....	157
VII.	Conclusiones	167
VIII.	Recomendaciones	169
IX.	Bibliografía	172
X.	Anexos	188
Anexo 1.	Cronograma de actividades	188
Anexo 2.	Presupuesto.....	190
Anexo 4.	Encuesta para el sector residencial	192
Anexo 5.	Encuesta para el sector comercial	197
Anexo 7.	Etiqueta para la identificación de las viviendas a muestrear.....	204
Anexo 8.	Etiqueta para la identificación de los comercios a muestrear.....	204
Anexo 9.	Peso total de los residuos orgánicos, número de personas y generación per cápita (GPC) de cada vivienda muestreada durante la semana del estudio	205
Anexo 10.	Peso total de los residuos orgánicos generados en los comercios muestreados y durante la semana del estudio	207
Anexo 11.	Comparativa de proyectos de compostaje: Volumen de residuos orgánicos, recursos humanos y tamaño de plantas por municipalidad en Costa Rica.....	208
Anexo 12.	Croquis utilizados para la selección e identificación de las viviendas y comercios durante los muestreos.....	209
Anexo 13.	Base de datos municipal sobre costos de recolección y de recurso humano.....	210
Anexo 14.	Base de datos municipal sobre consumos de combustible	211

Índice de tablas

Tabla 1.	Ventajas y desventajas del compostaje centralizado	24
Tabla 2.	Clasificación de los grupos de Microorganismos de Montaña.....	29
Tabla 3.	Parámetros fisicoquímicos de control durante el proceso de compostaje	31
Tabla 4.	Variables dependientes e independientes consideradas en el estudio.....	49
Tabla 5.	Materiales, insumos y equipos requeridos para las actividades en el proceso	53

Tabla 6. Relación C/N de los materiales utilizados en la composición de las pilas.....	55
Tabla 7. Datos utilizados para el cálculo de la relación C/N inicial con el primer método	56
Tabla 8. Datos utilizados para el cálculo de la relación C/N inicial con el segundo método.....	57
Tabla 9. Cantidades de insumos utilizados en la formación de las pilas por cada tratamiento	63
Tabla 10. Equipos utilizados para la medición de los parámetros fisicoquímicos	67
Tabla 11. Temperatura máxima obtenida por los tratamientos en la etapa termófila (T>40 °C)..	98
Tabla 12. Resultados de pH, % de humedad, relación C/N y comparación con la NCh2880....	107
Tabla 13. Resultados nutricionales (NT, CT, P, K) de los diferentes tratamientos.....	110
Tabla 14. Resultados de micronutrientes en los diferentes tipos de compost	112
Tabla 15. Resultados de metales pesados y comparación con los límites de la NCh2880.....	114
Tabla 16. Costos de implementación: Equipos y materiales	116
Tabla 17. Costos mensuales en insumos para la formación de las hileras	116
Tabla 18. Costos del servicio de recolección por camión	117
Tabla 19. Costos de combustible para la recolección de residuos orgánicos	118
Tabla 20. Costos de recurso humano para el personal de recolección y del proceso operativo..	118
Tabla 21. Costos de recurso humano para el personal operador del camión recolector.....	119
Tabla 22. Comparación entre costos e ingresos	122
Tabla 23. Cantidades históricas de comercios en el distrito de Guápiles.....	126
Tabla 24. Insumos y cantidades iniciales de los residuos a compostar por día de recolección..	131
Tabla 25. Dimensiones recomendadas para las hileras	134
Tabla 26. Materiales de apoyo para las labores del proceso de compostaje	146
Tabla 27. Equipos de medición	149
Tabla 28. Equipos de seguridad y protección personal	150
Tabla 29. Resumen de los rangos recomendados para los diferentes parámetros	155
Tabla 30. Concentraciones máximas de metales pesados de la NCh2880	157
Tabla 31. Requisitos microbiológicos establecidos por la NCh2880.....	158

Índice de figuras

Figura 1. Definición y clasificación de los residuos según la Ley N°8839	21
Figura 2. Gestión de residuos orgánicos bajo el modelo de economía lineal	26
Figura 3. Gestión de residuos orgánicos bajo el modelo de economía circular.....	26
Figura 4. Mapa del cantón de Pococí.....	37
Figura 5. Composición porcentual de los residuos sólidos del cantón de Pococí.....	38
Figura 6. Mapa de puntos de muestreo el sector comercial del área céntrica de Guápiles.....	47
Figura 7. Diseño experimental de las pruebas de compostaje	50
Figura 8. Abono orgánico utilizado como compost maduro.....	54
Figura 9. Calculadora online de relación C/N inicial de la Universidad de Cornell	57
Figura 10. Acondicionamiento del área experimental	59
Figura 11. Muestras de RO recolectadas en viviendas.....	60
Figura 12. Camión utilizado para la recolección de los RO	61
Figura 13. Recolección de los RO en el camión municipal.....	62
Figura 14. Secuencia del proceso de formación de las pilas de compostaje.....	64
Figura 15. Aspecto de las pilas de compostaje el primer día después de su formación	65
Figura 16. Prueba de puño para conocer el contenido de humedad.....	68
Figura 17. Prueba de gases para determinar la finalización del periodo de maduración.....	70
Figura 18. Porcentaje de viviendas y frecuencia con la que separan los residuos valorizables...	75
Figura 19. Tipos de residuos orgánicos generados en mayor cantidad según percepción	76
Figura 20. Manejo de residuos orgánicos en viviendas	78
Figura 21. Manejo de residuos de jardín en viviendas.....	80
Figura 22. Distribución porcentual de los tipos de comercios encuestados	81
Figura 23. Frecuencia de separación de los residuos valorizables en el sector comercial.....	83
Figura 24. Tipos de residuos orgánicos generados en mayor cantidad en comercios.....	84
Figura 25. Manejo de residuos orgánicos en comercios	85
Figura 26. Correlación entre residuos orgánicos generados y personas por vivienda	87
Figura 27. Distribución porcentual de los tipos de comercios participantes	90
Figura 28. Porcentaje de generación por tipo de comercio.....	90

Figura 29. Principales comercios generadores de residuos orgánicos (RO) y sus cantidades en kilogramos: análisis del total semanal, promedio diario y mínimo	91
Figura 30. Medio de participación de los comercios para la cuantificación de los residuos	93
Figura 31. Gestión de RO en comercios	94
Figura 32. Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje entre los tratamientos con MM (T1), el sistema de control (T0) y la temperatura ambiente (T.a)	96
Figura 33. Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje entre los tratamientos con compost maduro (T2), el sistema de control (T0) y la temperatura ambiente (T.a)	96
Figura 34. Evolución de la temperatura en el proceso entre los tres tratamientos con MM y compost maduro (T3), el sistema de control (T0) y la temperatura ambiente (T.a)	97
Figura 35. Evolución del pH entre los tratamientos con MM (T1) y el control (T0)	104
Figura 36. Evolución del pH entre los tratamientos con compost maduro (T2) y control (T0)....	105
Figura 37. Evolución del pH entre los tres tratamientos con MM y compost maduro (T3) y el sistema de control (T0)	105
Figura 38. Promedio de los resultados de pH, relación C/N y % de NT	109
Figura 39. Densidad comercial en el distrito de Guápiles del 2012 al 2022	127
Figura 40. Posible ubicación de la planta de compostaje en el Plantel Municipal, Guápiles	130
Figura 41. Dimensiones recomendadas de las pilas de compostaje.....	132
Figura 42. Distribución del área de la planta de compostaje	135
Figura 43. Máquina trituradora para residuos de jardín.....	147
Figura 44. Máquina tipo trómel para el tamizaje del compost	148
Figura 45. Máquina volteadora	148
Figura 46. Secuencia de operaciones clave en el proceso de compostaje	151
Figura 47. Puntos de medición de la temperatura en las hileras	153

I. Introducción

1.1 Antecedentes

La gestión de residuos se ha convertido en un desafío global cada vez más apremiante. Informes como “What a Waste 2,0” del Banco Mundial han destacado la creciente generación de residuos sólidos a nivel mundial, estimando que se producen alrededor de 2 010 millones de toneladas anuales, de las cuales alrededor del 33 % no es eliminado mediante un método ambientalmente adecuado (Kaza et al., 2018). Además, se proyecta un incremento del 70 % en la generación de residuos para el 2050 con respecto al 2016, llegando a alcanzar hasta 3 400 millones de toneladas anuales si no se toman medidas urgentes para mitigar esta problemática (Cheng, et al., 2021).

El incremento en la generación está estrechamente vinculado al crecimiento demográfico y económico del siglo XX, así como a la rápida urbanización, lo que ocasiona una presión adicional sobre los sistemas de gestión de residuos haciendo que la recolección y la disposición sean cada vez más desafiantes para los gobiernos a nivel mundial (Pinha y Sawaga, 2020). A su vez, diversas investigaciones afirman que la fracción orgánica de los residuos es alrededor del 50 % del total generado, siendo los residuos orgánicos de origen residencial, comercial, de sectores públicos y actividades agrícolas los producidos en mayor volumen (Soobhany, 2018). Ante esta situación, existen países que han implementado planes estratégicos como políticas de conversión de residuos en otros recursos o energía, donde los materiales son aprovechados de manera eficaz, evitando el desperdicio.

En la vanguardia de la gestión de residuos se encuentran Alemania, Bélgica, Suiza, Países Bajos y Suecia. Según el informe “Environment at a Glance 2015” de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), estos países han logrado tasas de recuperación que oscilan entre el 50 % y el 65 % mediante compostaje y reciclaje, aunque también emplean del 22 % al 50 % en incineración para generar energía. La implementación exitosa de estos programas ha requerido de una reestructuración profunda de las políticas de gestión de residuos, adoptando un enfoque de economía circular, como lo ejemplifica la "Ley de Economía Circular" en Alemania, que aplica principios como "quien contamina paga" y una jerarquía de cinco niveles: prevención, reutilización, reciclaje-compostaje, otras operaciones de recuperación y de último la eliminación (Segura et al., 2020). El informe más reciente del 2020 dio a conocer que Alemania, Bélgica, Suiza, Suecia y Finlandia, ya no depositan residuos municipales en vertederos (OECD, 2020).

En lo concerniente a Costa Rica, a través de los años se ha caracterizado por su proyección internacional como un país comprometido con la sostenibilidad ambiental, lo cual se refleja en su

participación en distintos tratados y acuerdos internacionales. Entre ellos, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), conocida como Cumbre de la Tierra, realizada en 1992 en Río de Janeiro. Posteriormente, en 1995 se ratifica el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación. En el 2007, el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes y en 2009 el Convenio de Rotterdam que regula el transporte de plaguicidas y productos químicos peligrosos. En 2015, se celebró la COP21 como parte de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y en 2018, se firmó el Acuerdo de Escazú en Costa Rica, el único vinculante emanado de Río+20 y el primero regional ambiental de América Latina y el Caribe, así como pionero mundial sobre defensores de derechos humanos en temas ambientales.

Costa Rica se convirtió en el primer país del mundo en firmar un Pacto Nacional por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), derivados de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible celebrada en Río de Janeiro en 2012. La llamada Agenda 2030, tiene el propósito de establecer los mecanismos de implementación de los 17 ODS, que están directa o indirectamente vinculados entre sí. Para lograrlo, se emitió el Decreto N° 40203-PLAN-RE-MINAE y se han realizado actividades de sensibilización con instituciones públicas, el sector privado y la sociedad civil (Secretaría Técnica de los ODS en Costa Rica, 2020).

A nivel nacional, se ha establecido un fuerte marco regulatorio sobre residuos, incluida la Ley N° 8839 para la Gestión Integral de Residuos, de la cual se derivan reglamentos como el Decreto N° 36093-S: Manejo de Residuos Sólidos Ordinarios, Decreto N° 38272-S: Declaratoria de Residuos de Manejo Especial y el Decreto N° 41527-S-MINAE: Clasificación y Manejo de Residuos Peligrosos. A su vez, se han implementado estrategias como el Plan de Residuos Sólidos de Costa Rica (PRESOL) 2008-2015. No obstante, un análisis de 2016 reveló que no cumplió con sus objetivos (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible de la Universidad de Costa Rica [ProDUS-UCR], 2016). En 2011, se fundó la Alianza para el Reciclaje, una coalición público-privada enfocada en aumentar la cantidad y calidad del reciclaje recuperado a nivel nacional, brindando capacitación a centros de acopio, publicando una Guía de Reciclaje y fortaleciendo los modelos municipales de gestión de residuos (Rodríguez, 2020).

Entre los esfuerzos más recientes, se emitió el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021 y la Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR). Estas, surgen como respuesta ante la necesidad de actualizar el PRESOL y guiar las acciones gubernamentales y privadas para la implementación de la Política Nacional para

la Gestión de Residuos 2010-2021 (Ministerio de Salud, 2016a). Asimismo, se han desarrollado otros instrumentos orientadores dirigidos al sector público, como la “Guía para la Gestión Integral de Residuos en las instituciones del sector público de Costa Rica”, la “Guía Práctica para el Manejo de Residuos en el Sector Público Costarricense” y el “Manual para la Elaboración de Planes Municipales de Gestión de Residuos Sólidos”.

Sin embargo, los esfuerzos para el abordaje específico de los residuos orgánicos son escasos y recientes. En el 2020 se emitió el I Plan Nacional de Compostaje 2020-2050, el cual se elaboró como una iniciativa dentro del Plan de Acción de la Gestión Integral de Residuos 2019-2022. En este se establecen siete ejes estratégicos, con acciones y tareas que procuran la incorporación paulatina del aprovechamiento de la materia orgánica en la sociedad, brindando las herramientas necesarias para incorporar prácticas de compostaje y conocimientos para el uso del compost y así promover el desarrollo de una economía circular en el territorio nacional (Consejo Nacional Ambiental, 2020).

Respecto a los antecedentes a nivel local, la población del cantón de Pococí es 59,2 % de tipo urbano y la actividad predominante es la producción agropecuaria. No obstante, el distrito de Guápiles se destaca como uno de los que posee una mayor influencia urbanística, siendo casi el 87 % de su población urbana. A su vez, es la excepción en el tipo de actividades que se desarrollan, pues predominan los servicios, el comercio y en menor medida las agroindustrias (Instituto de Desarrollo Rural [INDER], 2015 y Comisión GIR Pococí, 2017). Pococí inició la recuperación de residuos valorizables hace alrededor de 30 años, gracias a un grupo organizado de ciudadanos. Posteriormente, en 2007 se firma el “Convenio para Desarrollar el Plan Integral de Gestión para los Residuos Sólidos del Cantón” entre la Municipalidad de Pococí y la Fundación Pococí Limpio, por un periodo de 20 años. Este convenio tenía como objetivo implementar estrategias específicas para lograr una gestión integral de residuos (Comisión GIR Pococí, 2017).

Dos años más tarde, se inicia un proceso de colaboración junto con la organización GIZ-Alemania, en el que se forma una propuesta concreta para la valorización de los residuos del cantón, incluyendo la creación de un Parque Tecnológico Ambiental. Se planteó la recolección selectiva desde la fuente y la instalación de un centro de acopio cantonal, el cual, incluiría un área destinada al tratamiento de los residuos orgánicos. El proyecto fue declarado de interés público y nacional en el 2011 por el Gobierno Chinchilla Miranda (La Gaceta No.46, 07 de marzo de 2011, p.7). A pesar de esto, la inversión estimada se consideró muy elevada, por lo que no recibió el apoyo necesario para desarrollarlo (Comisión GIR Pococí, 2017).

Del 2011 al 2016, los residuos valorizables comenzaron a ser procesados gracias a un convenio con la Asociación de Exposiciones Agropecuarias de Pococí (Expo Pococí), que sirvió como espacio físico. En ese período, se procesaban alrededor de 41 ton al mes, pero según el PMGIR-Pococí 2017-2022, el proyecto no tuvo éxito debido a la falta de apoyo a la Fundación Pococí Limpio. A partir del 2016, inició un nuevo proyecto de recolección y tratamiento de valorizables mediante Convenios de Cooperación con Centros de Acopio locales. En este nuevo enfoque, el municipio recolecta el material y lo lleva a estos Centros para su valorización.

Entre 2018 y 2019, se realizó un nuevo estudio de generación y composición de residuos sólidos, así como la contratación de una educadora ambiental que desarrolló el Programa de Educación Ambiental Municipal que incluye capacitaciones específicas sobre compostaje. Esto dio inicio en el 2020 al Programa de Compostaje Doméstico llamado Pococí Composta, destinado a brindar composteras rotativas a diversas familias y escuelas del cantón, así como dar capacitación y acompañamiento. Finalmente, en el 2023 se emitió el PMGIR-Pococí 2023-2028, en el cual se le da un gran enfoque la gestión de los residuos orgánicos.

1.2 Problema

Actualmente, a nivel mundial se emplean tres métodos principales para el tratamiento de los residuos sólidos municipales: rellenos sanitarios, incineración y compostaje. Aunque los rellenos sanitarios son la opción más utilizada debido a su bajo costo y simplicidad operativa, presentan serios problemas ambientales como la generación de gases y lixiviados (Nie et al., 2018). Además, la construcción de nuevos rellenos se considera un reto debido a la escasez de tierras disponibles (Nie et al., 2018), y el creciente aumento en la generación de residuos ha repercutido en que la recolección y la adquisición de terrenos para su tratamiento y eliminación sea cada vez más difícil, desafiando constantemente a los diferentes gobiernos (Pinha y Sawaga, 2020).

A nivel global, el compostaje se ha reconocido como una alternativa más sostenible para tratar la gran cantidad de residuos orgánicos, pero a pesar de los avances en algunos países desarrollados, sigue siendo un desafío significativo a nivel mundial, especialmente en países en desarrollo (Tong, et al., 2021). El presupuesto de las administraciones locales es un factor limitante en el tratamiento de residuos, principalmente en países con ingresos bajos y medios, donde se destina entre el 10 % y el 20 % de los ingresos municipales, en contraste con el 4 % en países con ingresos altos. Este escenario complica las operaciones de gestión, ya que se compite por financiamiento con otras prioridades como el suministro de agua potable, la educación y la salud.

Esta competencia se ve agravada por obstáculos adicionales, como la capacidad limitada de planificación y seguimiento operativo (Kaza et al., 2018).

Según el Ministerio de Salud (2016b), en Costa Rica se producen alrededor de 4 000 ton diarias de residuos, de las cuales, su disposición final es de un 58,35 % en rellenos sanitarios, un 19,85 % en vertederos controlados y 21,30 % en botaderos a cielo abierto. Datos presentados en el Informe Estado de la Nación (2019), indican que la valorización de residuos a nivel nacional alcanza actualmente un valor entre el 5 % y el 7 %, este bajo porcentaje se atribuye a múltiples factores, entre los que se destaca el poco apoyo hacia el mercado del reciclaje, la falta de equipo, tecnologías y sitios para la gestión y tratamiento, el desinterés y/o poca capacitación a la población y diversas dificultades que enfrentan las municipalidades para asumir su responsabilidad dentro de esta problemática (Abarca et al., 2015, como se citó en Rodríguez, 2020).

De las 4 000 ton generadas diariamente, alrededor del 60 % corresponde a la parte orgánica, por lo cual, si se halla una alternativa para aprovecharlos, se disminuiría la cantidad de residuos para disposición final y habría una mejor utilización del tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios, disminuyendo costos y mejorando la eficiencia en el uso de los recursos (Consejo Nacional Ambiental, 2020). Sin embargo, solo seis cantones poseen proyectos de compostaje centralizado para el tratamiento de los residuos orgánicos, entre estos se encuentran: Jiménez, Alvarado, Pérez Zeledón, Tilarán, San Rafael y San Isidro de Heredia, siendo un tema en el que urge un abordaje por parte de los diferentes municipios (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022).

Los servicios municipales de recolección de residuos presentan diversas debilidades, especialmente en lo que respecta al diseño de rutas y al estado de los camiones. A nivel nacional, casi la mitad de los camiones recolectores se encuentran en mal estado, lo que afecta la accesibilidad a diferentes áreas y repercute en la eficiencia y continuidad del servicio, así como en su cobertura. Este problema se agrava considerando la distancia hasta los sitios de disposición final (Ministerio de Salud, 2016b). En cuanto al aspecto sociocultural, el hábito de separar adecuadamente los residuos no está generalizado en toda la población, y en el ámbito legal, las autoridades locales carecen de claridad en la aplicación de sanciones e incentivos para fomentar la reducción y valorización de residuos desde su origen (Masis y Abarca, 2019).

A pesar de los esfuerzos realizados a nivel nacional en materia de gestión de residuos, la materialización de los compromisos asumidos a lo largo de más de 20 años ha sido limitada. Aunque Costa Rica cuenta con un amplio marco legal ambiental y ha participado en diversas estrategias y negociaciones internacionales, el manejo de los residuos sólidos sigue siendo uno de

los temas con menor desarrollo. Esta brecha entre la teoría y la práctica en la gestión de residuos ha generado preocupación en los diferentes municipios del país y se ha convertido en uno de los problemas más apremiantes (Anchía, 2018).

A nivel local, en el PMGIR-Pococí 2017-2022 se menciona que la cobertura actual del servicio de recolección es de aproximadamente el 60 %, con una valorización de residuos general de un 2,1 %. A su vez, del 2011 al 2016, se registró un promedio total anual de 14 726,07 ton, de las cuales el 26 % correspondió a los residuos orgánicos, siendo estos los más abundantes con 4 867,20 ton anuales. No obstante, un estudio más reciente realizado en 2018 reveló que el porcentaje de los orgánicos es aún mayor, siendo del 58,1 % en el sector domiciliario y del 44,1 % al 67,4 % en el comercial, dependiendo del tipo de comercio. Este estudio, que analizó los flujos de materiales, determinó que para dicho año se generaron anualmente un total de 10 016,79 ton de residuos, de las cuales 7 408,04 ton se destinaron al Relleno Sanitario Los Laureles.

Del ese total reportado, que consiste en el valor más reciente calculado, se determinó que se recuperan alrededor de 2 115,35 ton anuales mediante campañas de reciclaje y recolección de los sectores municipal, privado e informal, lo que equivale al 21,09 %. Mientras que la cantidad de residuos orgánicos representa aproximadamente 5 704,64 ton, pero el entierro o esparcimiento de estos residuos asciende a 1 204,89 ton por año (Solís, 2018). A pesar de la magnitud de esta fracción orgánica, el cantón carece de un plan específico para su manejo y tratamiento, lo que subraya la urgencia de abordar este problema, tanto por las necesidades ambientales como por sus beneficios económicos. Además, las cantidades exactas generadas por los sectores residenciales y comerciales de este tipo de residuos, así como los métodos empleados para su disposición, aún no se conocen completamente. Por esta razón, el gobierno local de Pococí ha expresado su interés en investigar más a fondo la generación y las prácticas asociadas con los residuos orgánicos, con el fin de implementar un sistema de tratamiento adecuado.

1.3 Justificación

La gestión inadecuada de los residuos puede tener repercusiones significativas en la población y el ambiente, incluyendo impactos en la salud y la contaminación de diversas matrices ambientales como el aire, el suelo y el agua, tanto superficial como subterránea. Además, puede tener consecuencias secundarias como la obstrucción de desagües, que a su vez aumenta el riesgo de inundaciones (Turcott et al., 2021). Aunado a lo anterior, existen muchas otras razones para manejar de forma correcta los residuos, una de ellas es la escasez de vertederos y espacios para el

tratamiento de residuos, a lo que se suma la preocupación del daño que causan las sustancias tóxicas derivadas de distintos componentes gestionados inadecuadamente (Nandini et al., 2020).

Se sabe que aproximadamente el 58,1 % de los residuos en el sector domiciliario y entre el 44,1 % y el 67,4 % en el comercial, son de naturaleza orgánica. Además de ser un porcentaje significativo, gran parte de estos son recolectados semanalmente por los camiones municipales, contribuyendo considerablemente al peso total dispuesto en el relleno sanitario. Conjuntamente, su descomposición genera gran cantidad de lixiviados, que a menudo se derraman en las vías públicas debido al mal estado de los camiones recolectores. Esta situación no solo afecta el cronograma de rutas diarias, sino que también representa un desafío para la capacidad de almacenamiento de los vehículos recolectores (Solís, 2018). En este contexto, resulta fundamental mejorar la gestión de los residuos orgánicos, dados su alto volumen y su potencial para el compostaje, que se identifica como el método más rentable para su tratamiento (Soobhany, 2018).

Por otra parte, la Ley N°8839 para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, establece en el artículo 8: “que las municipalidades tienen el deber de garantizar una gestión integral de residuos en su territorio, así como brindar el servicio de recolección de manera selectiva y eficiente para toda su población y desarrollar planes municipales enfocados en la atención de esta área de la gestión ambiental” (Ley N°8839, 2010). Asimismo, la ENSRVR menciona que los gobiernos locales deben valorar la construcción de las instalaciones necesarias para atender esta problemática, pero solo un 30,4 % de las municipalidades del país cuenta con un centro de valorización de residuos propio y a pesar del alto porcentaje que los orgánicos representan, son muy pocos los gobiernos locales que poseen sistemas de tratamiento específicos para estos (Masis y Abarca, 2019).

De esta manera, según Romano & Molinos (2020), es necesario mejorar la eficiencia de las municipalidades en el ejercicio de la gestión de los residuos y así reducir los costos, brindar servicios de mejor calidad, disminuir las tarifas y, además, cumplir con la legislación vigente. Con el fin de lograr este objetivo, estas instituciones deben asumir su gobernanza considerando a la economía circular como un aspecto indispensable dentro de la gestión ambiental, pues es la base para gestionar los recursos de manera más eficiente al cerrar los ciclos de los materiales presentes en los residuos sólidos municipales, mejorando así los flujos económicos (Zeller et al., 2019 y Ming et al., 2020).

Bajo este enfoque, se espera que la Propuesta para el Tratamiento de los Residuos Orgánicos Domiciliarios y Comerciales para el distrito de Guápiles, como parte del Plan Municipal

de Gestión Integral de Residuos de Pococí, permita generar beneficios económicos, sociales y ambientales a través del aprovechamiento de los residuos orgánicos. Esto incluye la prevención de problemas ambientales como la contaminación del agua por lixiviados, malos olores, generación de vectores transmisores de enfermedades, degradación del paisaje, disminución de la vida útil de los rellenos o la contaminación del aire, asociada a los gases producidos con la putrefacción de estos residuos, por lo que su implementación podría eventualmente incidir en la mejora de la salud pública y calidad de vida de las personas de este distrito.

A su vez, se busca que el gobierno local obtenga beneficios económicos al evitar destinar recursos al tratamiento de este importante porcentaje de residuos en el relleno sanitario y al aprovechar la venta del abono generado. Esto podría traducirse en ajustes en las tarifas para la población y en la redistribución de los recursos económicos hacia la atención de otras problemáticas ambientales. Por lo tanto, esta investigación aspira a proporcionar información crucial para la toma de decisiones por parte de la municipalidad. Se espera que la posible implementación de la propuesta en los próximos años sea beneficiosa, permitiendo su replicación en otros distritos del cantón y potenciando sus impactos positivos a mediano y largo plazo.

El presente estudio, busca investigar aspectos relacionados con la generación y las prácticas de disposición de residuos orgánicos en los sectores residencial y comercial del distrito de Guápiles. Además, analizar métodos de tratamiento mediante el compostaje para desarrollar una propuesta de aprovechamiento de estos residuos en el territorio. El estudio pretende incidir en la optimización del proceso de gestión, desde la recolección hasta la comercialización del producto generado, considerando propuestas generales para el diseño del sitio, capacitación, operación y mantenimiento del proceso, de manera que el abordaje sea integral bajo el concepto de economía circular, aprovechando sus múltiples beneficios para mejorar las condiciones ambientales actuales.

II. Objetivos

2.1 Objetivo general

Elaborar una propuesta de recolección y tratamiento de los residuos orgánicos domiciliarios y comerciales para el distrito de Guápiles del cantón de Pococí, mediante la evaluación de tres variaciones de un método de compostaje y su viabilidad técnica, con el propósito de darle valor y aprovechamiento a los residuos orgánicos que se generan en el distrito.

2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar la generación y manejo de residuos orgánicos de viviendas y principales comercios generadores de los mismos del distrito central de Pococí, a través de un mapeo y seguimiento de los sitios seleccionados, para la comprensión de su situación actual.
- b) Evaluar la viabilidad de implementación de tres variaciones del método de compostaje, pilas con volteo a gran escala mediante revisión bibliográfica y pruebas de campo, para la determinación del procedimiento que más se adapta a las condiciones ambientales y económicas del distrito de Guápiles.
- c) Desarrollar una propuesta desde el enfoque de economía circular, para el tratamiento de los residuos orgánicos domiciliarios y comerciales del distrito de Guápiles, a través del análisis de las necesidades de diseño del espacio físico, de aspectos técnicos de operación, gestión y administración, con el fin de buscar la gestión integral de este tipo de residuos para el distrito.

Las actividades necesarias para lograr los objetivos del proyecto se han estructurado en un cronograma que especifica los plazos correspondientes. Este cronograma está disponible en el **Anexo 1**, mientras que el presupuesto general se encuentra detallado en el **Anexo 2**.

III. Marco Conceptual

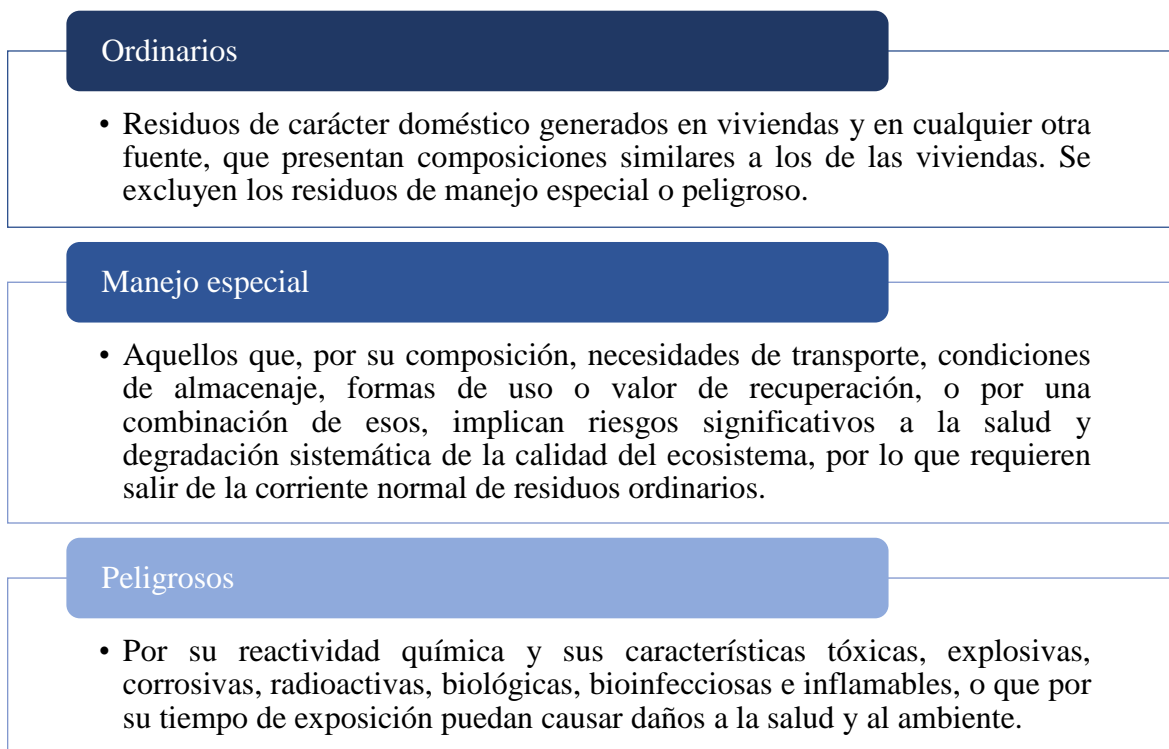
Esta sección abarca conceptos fundamentales que proporcionan una comprensión general del tema de estudio. Se destaca el concepto de residuos orgánicos y su clasificación dentro de la legislación costarricense, así como sus tipos y características. Luego, se aborda la definición de compostaje y su relación con la economía circular. Se detallan los métodos que serán evaluados y las variables necesarias de monitorear durante el proceso, así como la legislación pertinente.

3.1 Definición y características de los residuos orgánicos

Un residuo es un material sólido, semisólido, líquido o gaseoso, del cual la persona que lo genera requiere deshacerse de él y que además puede ser valorizado, tratado responsablemente o manejado por un sistema de disposición final adecuado. Según sus características, los residuos se clasifican en tres grandes categorías, que corresponden a ordinarios, de manejo especial y peligrosos (Ley N°8839, 2010), los cuales se definen a continuación (Figura 1).

Figura 1

Clasificación de los residuos según la Ley para la Gestión Integral de Residuos N°8839



Nota. Adaptado de *Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839*, por la Asamblea Legislativa, 2010, SCIJ.

Según las definiciones anteriores, los residuos orgánicos se incluyen dentro de la categoría de ordinarios y se definen como residuos que se descomponen rápidamente de forma natural, transformándose en otro tipo de materia orgánica, lo que hace posible su procesamiento, mediante técnicas de compostaje para ser aprovechados como abono. Además, sus principales fuentes de generación son las viviendas, industrias, plantas de tratamiento y diferentes procesos agrícolas como la agricultura, horticultura y silvicultura (Garita y Rojas, 2015).

En términos generales, estos pueden clasificarse en tres categorías principales. En primer lugar, se encuentran los restos de comida, generados principalmente en hogares y establecimientos de comida como resultado de la preparación de alimentos. Este grupo incluye tanto los restos cocinados como los crudos. En segundo lugar, están las podas y los residuos de jardín, los cuales se originan en parques o jardines y tienden a ocupar grandes volúmenes. Por lo general, estos tienen poco peso y están compuestos principalmente por ramas, hojas, follajes y partes leñosas.

Finalmente, se encuentran las excretas de animales, donde las más comunes utilizadas en prácticas de compostaje son las de ganado vacuno, equinos, cerdos, ovejas y cabras (Garita y Rojas, 2015).

3.2 Compostaje como una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos

3.2.1 Definición y descripción general del proceso de compostaje

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2015), define el compostaje como el proceso natural de putrefacción o descomposición de la materia orgánica por los microorganismos bajo condiciones controladas. Este método imita la transformación que ocurre naturalmente en el ambiente, produciendo humus, una tierra rica en nutrientes que genera un producto llamado compost. Según Arango (2017), el compost posee los nutrientes aportados por los residuos orgánicos, pero de una manera que pueden ser asimilados por las plantas, al mismo tiempo que mejora la estructura del suelo, su fertilidad física, estructura, aireación, porosidad, estabilidad, infiltración, conductividad hidráulica y retención de agua.

Por otra parte, existen múltiples maneras de hacer compostaje, pero de forma general puede dividirse en dos grandes grupos llamados compostaje centralizado y descentralizado. El método centralizado, el cual se abordará en la presente investigación, es el que se desarrolla en una planta a mayor escala, generalmente en la búsqueda de soluciones a nivel municipal o por parte de la gestión del sector privado, mientras que el descentralizado se realiza directamente en las viviendas (Consejo Nacional Ambiental, 2020). De acuerdo con la FAO (2013) y Páez (2021), el proceso de compostaje se divide en cuatro fases principales, las cuales se describen a continuación:

- **Mesofílica 1:** Es la primera de las etapas cuando recién se agregan los residuos y comienza el proceso de compostaje, tarda de dos a ocho días. Inicialmente, la temperatura es la ambiental, pero a los pocos días e incluso horas se presenta un incremento hasta los 45 °C a causa de la actividad bacteriana tras descomponer fuentes sencillas de C y N. A su vez, como resultado de la descomposición de compuestos solubles, como azúcares que producen ácidos grasos, el pH puede bajar hasta un rango de 4,0 a 4,5.
- **Termofílica:** También llamada fase de higienización, debido a que es la etapa en la que se presentan las mayores temperaturas. Inicia cuando se superan los 45 °C y alcanza hasta los 65 °C aproximadamente; en estas se destruyen bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp*, así como otros elementos indeseados. Una vez que la temperatura supera los 45 °C, los microorganismos descomponedores que se desarrollan a altas temperaturas comienzan a crecer, en su mayoría bacterias termófilas,

reemplazando a las anteriores e iniciando con la descomposición de fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina. La duración de esta fase dependerá de la cantidad de material agregado, el lugar y la condición climática, entre otros, no obstante, puede tardar desde días hasta meses.

- **Enfriamiento o mesofílica 2:** Se continúa con la degradación de ciertas formas de carbono más complejas, sin embargo, la mayor parte de este carbono y en especial, del nitrógeno añadido como parte de los residuos orgánicos, ya fueron degradados. Como resultado, las temperaturas vuelven a descender por debajo de los 45 °C hasta llegar nuevamente a la temperatura ambiente y el pH se mantiene ligeramente alcalino. Cabe destacar que esta etapa se puede confundir con la de maduración y tarda varias semanas, pero se puede saber que llegó a su fin cuando mantiene la temperatura ambiente durante tres días consecutivos.
- **Maduración:** Inicia cuando nuevamente se alcanza la temperatura ambiental y se mantiene durante al menos tres días consecutivos, a pesar de que se realice un volteo. Esta es considerada la etapa que requiere de una mayor cantidad de tiempo, entre 3 y 9 meses según el método utilizado y las condiciones ambientales, sin embargo, el mínimo recomendado es de 30 a 60 días debido a que este lapso será necesario para estabilizar los compuestos recién formados durante el compostaje, así como el pH que debe alcanzar valores cercanos a la neutralidad, estableciéndose como rango recomendado de 5,0 a 8,5 por la Norma Chilena NCh2880 (2004): Compost - Clasificación y Requisitos.

Para determinar si se ha entrado en etapa de maduración, es factible insertar un instrumento metálico en el centro de la pila durante 10 minutos, si al retirarlo se percibe un calor quemante al tacto, significa que el material está en proceso de descomposición y requiere continuar con el compostaje. Por otra parte, para identificar si el compost ha madurado completamente, se deben evaluar varios factores: Primero, es crucial considerar el aspecto y el olor del material; este debe ser oscuro y tener un aroma a suelo húmedo. Segundo, al realizar la prueba del puño, no debe mostrar exceso de humedad. Finalmente, se puede realizar un muestreo cuarteado, tomando tres muestras de 100 g de cada cuarto y colocándolas en bolsas plásticas durante dos días en un ambiente fresco y seco. Si al finalizar este período las bolsas se observan hinchadas de aire y con condensación de humedad, es un indicativo de que todavía se encuentra inmaduro.

3.2.2 Ventajas y desventajas del compostaje

Como toda tecnología, el compostaje para el tratamiento de residuos orgánicos también posee ventajas como desventajas, las principales de ellas se agruparon en la Tabla 1 y son necesarias de considerar al momento de su aplicación.

Tabla 1

Ventajas y desventajas del compostaje centralizado

Ventajas	Desventajas
Rápida degradación de residuos	Se requiere un terreno para desarrollar el proceso
Inversión relativamente baja	Generación de lixiviados
Beneficios económicos	Malos olores si no hay un control adecuado
Mejora de las propiedades del suelo	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)
Disminución en el uso de fertilizantes químicos	Reproducción de malezas
Reducción de la contaminación ambiental	Necesidad de conocimientos técnicos del proceso
Remediación de suelos	
Aumento de la vida útil de rellenos sanitarios	
Generación de empleo	

Nota. Adaptado de “Alternative method of composting on a reclaimed municipal waste landfill in accordance with the circular economy: Benefits and risks” (p. 137971), por Vaverková et al., 2020, *Science of The Total Environment*, 723.

Entre los beneficios más destacables, se encuentran el aprovechamiento de los macro y micronutrientes y los microorganismos benéficos de los residuos orgánicos, haciendo posible su utilización como una fuente rentable para disminuir el consumo de fertilizantes minerales. Asimismo, el producto resultante ha demostrado gran efectividad para la biorremediación de suelos contaminados por metales pesados y contaminantes orgánicos, al funcionar como un agente limpiador y restaurador. Es gracias a sus múltiples ventajas que del 2000 al 2016 el compostaje industrial para el tratamiento de RO municipales a nivel internacional ha aumentado de un 9 % a un 16 % (Corato, 2020).

Por lo tanto, este tratamiento ha demostrado ser una solución adecuada y económica que puede ayudar a cerrar el ciclo de estos materiales. A pesar de esto, existen ciertas desventajas, en especial respecto a sucesos que pueden ocurrir durante el proceso operativo si no se da un manejo adecuado, tales como malos olores, lixiviados, germinación de malezas o emisiones de GEI relacionadas al método de tratamiento utilizado. De igual forma, se requiere de una inversión, un espacio físico y conocimientos técnicos sobre el proceso para desarrollarlo exitosamente, además

de un buen sistema de seguimiento y control. Con relación a esto, otro de los puntos críticos es la comercialización del producto y su calidad, aunque, aun así, los beneficios asociados son mayores (Vaverková et al., 2020).

3.3 Economía Circular dentro del proceso de compostaje

3.3.1 Concepto de Economía Circular y su relación con el compostaje

La economía circular, es un concepto que plantea el desarrollo de un modelo de producción y consumo responsable y cíclico de los recursos, con el propósito de disminuir la carga que se ejerce sobre el ambiente y estimular la economía. Este enfoque busca disminuir la entrada de materiales, reduciendo así la generación de residuos y de esta manera desligar el crecimiento económico de la extracción constante de recursos naturales (Moraga et al., 2019). En otras palabras, promueve que, mediante la trazabilidad de los productos y la aplicación del principio de responsabilidad extendida del productor, los materiales, posterior a su utilización, no sean considerados residuos, sino que sean reutilizados o reciclados de tal manera que se genere un ciclo en la producción y economía al aumentar la eficiencia y minimizar el uso de materias primas (Consejo Nacional Ambiental [CNA], 2020).

Este concepto puede ser aplicado a diversos procesos y productos, sin embargo, uno de los más destacados corresponde a los residuos orgánicos. Como se ha mencionado anteriormente, la fracción orgánica de los residuos puede ser reciclada a través de métodos de compostaje, lo cual, según plantea el modelo económico mencionado, reduce la cantidad de residuos, al mismo tiempo en que, a estos se les encuentran nuevos usos, reincorporándolos al ciclo productivo (Corato, 2020). Según el CNA (2020), las degradaciones controladas de esta tecnología permiten volver a introducir a los suelos los nutrientes y materia orgánica, cumpliendo el objetivo del gobierno de aplicar la economía circular en la disposición de residuos para su gestión integral.

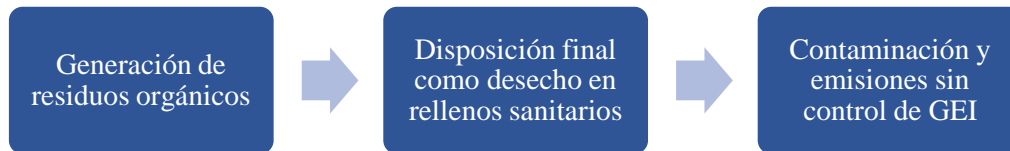
3.3.2 Importancia de la Economía Circular respecto con el modelo lineal de gestión

Actualmente, a pesar de que el modelo económico lineal continúa siendo predominante (ver Figura 2), se ha reconocido su insostenibilidad, acorde a lo advertido hace casi 50 años por el Club de Roma en el informe llamado Los Límites del Crecimiento (Wiesmeth, 2020 y Caucino, 2020), siendo esencial la transición a una economía circular (EC). Bajo esta perspectiva, durante los últimos años este concepto y su implementación está tomando mayor relevancia. China fue el primer país en promulgar una ley específica para este tema en 2008, seguido de Alemania y Japón, también pioneros en promoverlo en políticas concretas. De la misma manera, la Unión Europea

ha venido trabajando en este modelo, pues a finales de 2015, se aprobó un plan de acción para implementarlo en la unión y los estados miembros (Vaverková et al., 2020 & Moraga et al., 2019).

Figura 2

Gestión de residuos orgánicos bajo el modelo de economía lineal

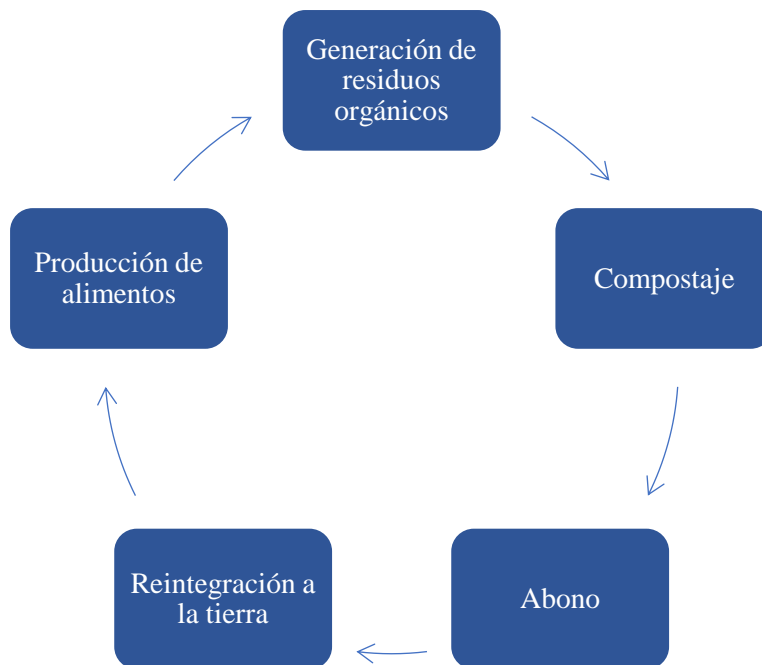


Nota. Adaptado de “Alternative method of composting on a reclaimed municipal waste landfill in accordance with the circular economy: Benefits and risks” (p. 137971), por Vaverková et al., 2020, *Science of The Total Environment*, 723.

De acuerdo con la **Figura 2**, el modelo lineal de gestión de residuos orgánicos únicamente considera este material como un desecho del que es necesario deshacerse, dejando de lado el aprovechamiento de sus múltiples beneficios. Por el contrario, la aplicación de la EC ilustrada en la **Figura 3**, de acuerdo con Vaverková et al., (2020), utiliza al máximo las propiedades de estos materiales, reincorporándolos al proceso de producción de alimentos bajo un enfoque cíclico.

Figura 3

Gestión de residuos orgánicos bajo el modelo de economía circular



Nota. Adaptado de “Alternative method of composting on a reclaimed municipal waste landfill in accordance with the circular economy: Benefits and risks” (p. 137971), por Vaverková et al., 2020, *Science of The Total Environment*, 723.

El cambio de perspectiva expuesto en la imagen anterior, evita que el crecimiento económico dependa de la explotación constante de recursos naturales, pues como se sabe, son finitos, por lo tanto, se requiere de mayor eficiencia en su uso, lo cual, es posible con la implementación del modelo de EC, que reduce los insumos de materias vírgenes, minimiza la generación de residuos y retiene al máximo el valor de los recursos, dando circularidad a los ciclos de los materiales y con ello a la economía. Por consiguiente, su implementación en la gestión de residuos orgánicos a través del compostaje se considera una solución adecuada para atender esta problemática (Vaverková et al., 2020).

3.4 Técnica de compostaje de pilas con volteo

El compostaje de pila es considerado el método más antiguo, sencillo y uno de los más adecuados cuando se debe compostar gran cantidad de material orgánico (Bernal, 2018). Es posible realizar este método cuando existe una abundante y heterogénea cantidad de residuos orgánicos, alrededor de 1 m³ o superior (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos [UAESP], 2014). Este tipo se puede desarrollar de diferentes maneras, las más utilizadas se describen a continuación:

- 1. Aireación forzada:** Utiliza canales que proporcionan aire que permita alcanzar rangos óptimos de oxígeno (Défaz y Gualoto, 2020). Los conductos de ventilación sirven tanto para proporcionar oxígeno como para enfriar la pila y el aire puede inyectarse de manera continua o en intervalos, con una velocidad variable, según las necesidades del sistema. No obstante, debe tenerse cuidado al medir el volumen de aire que ingresa debido a que puede conducir a un secado excesivo y generar zonas de enfriamiento permanente. Por lo general, este se controla con respecto a la temperatura dentro de la pila (Vargas, 2021).
- 2. Volteo manual:** Los montículos son armados en terrenos abiertos y se mezclan con herramientas manuales como, palas para garantizar su aireación, este método es sencillo, eficiente y se caracteriza porque la pila se remueve periódicamente con el objetivo de homogenizar la mezcla, aumentar la porosidad y controlar la humedad de pilas (Suárez, et al., 2017 y Vargas, 2021).
- 3. Sistema de pilas con volteo mecanizado:** Es un sistema que utiliza maquinaria para el volteo y aireación de las pilas de compostaje, los volteadores mecánicos a utilizar pueden ser palas

frontales o un tractor con un volteador lateral adaptado. En este caso la altura máxima de la pila es 3 m y al igual que los sistemas anteriores, se desarrollan en terrenos abiertos para facilitar el volteo (Suárez, et al., 2017 y Vargas, 2021).

En este estudio se desarrollará el método de volteo manual y el proceso consiste en colocar capas de residuos orgánicos secos ricos en carbono como hojas secas, trozos de ramas y aserrín, seguido de residuos frescos con alto contenido de nitrógeno como cáscaras y restos de alimentos. El material orgánico es fundamental para que el sistema alcance las temperaturas adecuadas para la higienización del compost, por lo que se requiere una cantidad de 50 kg a 100 kg de residuos biodegradables por cada pila (Röben, 2002). Los insumos que conforman la pila se amontonan en forma trapezoidal o de montículo según las cantidades a tratar y las dimensiones recomendadas por Aguilar (2015), son 1,5 m de ancho en la base inferior, 1,0 m en la base superior a 1,2 m de altura. Sin embargo, la forma y tamaño de la pila puede variar según las necesidades del sistema.

3.4.1 Pilas con volteo utilizando Microorganismos de Montaña (MM)

Los Microorganismos de Montaña (MM), son un conjunto de microorganismos ampliamente utilizados como un inoculante en prácticas agrícolas y procesos de compostaje alrededor del mundo, los cuales se encuentran en las capas superficiales de los suelos de ecosistemas naturales poco intervenidos y se componen en promedio de 80 especies de diez géneros, pertenecientes a cinco grupos de microorganismos que son: levaduras, bacterias fotosintéticas, bacterias acidolácticas, hongos filamentosos y actinomicetos (Méndez, 2019).

La elaboración de los MM tiene su fundamento en el método de los Microorganismos Eficientes (EM) desarrollado en los años 80 por el profesor Teruo Higa en Japón, los cuales son utilizados en más de 110 países alrededor del mundo en diversas aplicaciones (Cajahuanca, 2016). No obstante, los MM son una alternativa de menor costo, debido a que su producción aprovecha la diversidad microbiana autóctona presente en zonas boscosas a través de métodos de cultivo sencillos (Castro, et al., 2015). A su vez, se pueden producir en poco tiempo, son fáciles de aplicar y reducen los malos olores (Ramírez, 2017). Los MM se componen de gran diversidad de microorganismos, a continuación, se presentan en la **Tabla 2** los principales.

Tabla 2

Clasificación de los grupos de Microorganismos de Montaña

Microorganismos	Descripción
<p>Levaduras (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>, <i>Candida utilis</i>)</p>	<p>Poseen la capacidad de sintetizar vitaminas y sustancias antimicrobiales a partir de aminoácidos y azúcares producidos por bacterias fototróficas, materia orgánica y las raíces, lo cual ayuda al crecimiento de las plantas. En dicho proceso, suelen activar a otros microorganismos eficaces y las sustancias bioactivas, como hormonas y enzimas generadas por levaduras, provocan un incremento en la actividad celular (Almestar, 2019).</p>
<p>Actinomicetos (<i>Streptomyces albus</i>, <i>Streptomyces griseus</i>)</p>	<p>Son bacterias benéficas que actúan como antagonistas de muchas bacterias y hongos patógenos de las plantas, debido a que producen antibióticos, los cuales controlan estas poblaciones indeseadas y aumentan la resistencia de las plantas (Almestar, 2019).</p>
<p>Bacterias ácidolácticas (<i>Lactobacillus spp</i>, <i>Pediococcus spp</i>)</p>	<p>Producen ácido láctico a partir de azúcares y otros carbohidratos sintetizados por bacterias fototróficas y levaduras. El ácido láctico controla microorganismos nocivos y mejora la descomposición de la materia orgánica. A su vez, ayudan a desintegrar ciertos componentes presentes en la materia orgánica, tales como la lignina y la celulosa (Álvarez, 2018).</p>
<p>Bacterias fotosintéticas (<i>Rhodopseudomonas</i> <i>plastrus</i>, <i>Rhodobacter</i> <i>spaeroides</i>)</p>	<p>Bacterias autótrofas que sintetizan sustancias útiles como aminoácidos, ácidos nucleicos y azúcares, a partir de secreciones de las raíces, materia orgánica y gases dañinos, usando la luz solar y el calor del suelo como fuentes de energía. Asimismo, aumentan las poblaciones de otros microorganismos eficaces fijadores de nitrógeno, como los actinomicetos y los hongos micorrízicos (Almestar, 2019).</p>
<p>Hongos filamentosos (<i>Penicillium sp</i>, <i>Aspergillus</i> <i>sp</i>)</p>	<p>Sintetizan sustancias antimicrobianas, aminoácidos, azúcares, también hormonas y enzimas que promueven la división celular de los tejidos de la raíz de la planta y ayudan a aumentar la superficie de absorción de las raíces (Zeballos, 2017, p.2). Además, actúan como controladores biológicos que ayudan a disminuir el impacto de los microorganismos considerados patógenos (Méndez, 2019).</p>

Nota. Tomado de Almestar (2019), Álvarez (2018), Zeballos (2017) y Méndez (2019).

La gran diversidad de microorganismos que existen en los MM y gracias a su actividad enzimática y metabólica, permiten mejorar las condiciones del suelo, biotransformar la materia orgánica, acelerar la descomposición, degradar sustancias tóxicas, eliminar patógenos y mejorar la calidad, salud y el rendimiento de los cultivos, lo cual puede incidir en la disminución del uso de fertilizantes químicos y pesticidas (Cajahuanca, 2016., y Méndez, 2019). En el caso de la utilización de microorganismos en el método de pilas, el inóculo de MM se agrega para acelerar

el proceso conforme se va formando la pila y se recomienda revolver cada 7 días, y en cada volteo, volver a aplicar la solución (Aguilar, 2015).

3.4.2 Pilas con volteo utilizando compost maduro

El compost maduro se define como el “compost que ha finalizado todas las etapas del compostaje” (FAO, 2013, p.11). Su periodo de maduración tiende a ser de 5 a 6 meses desde que inicia el proceso, pero se puede extender dependiendo del propósito para el que se requiera, mientras que el mínimo recomendado es de un mes. Es posible saber que el compost ya está maduro debido a que no se observan materiales sin descomponer, con excepción de aquellos cuya degradación es muy lenta como las cáscaras de huevo, ramas, etc. Además, se puede diferenciar del compost inmaduro porque tiene un color oscuro y una textura terrosa (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino [MITECO], 2009).

Si bien este compost se utiliza principalmente como fertilizante a causa de su gran contenido de elementos minerales como nitrógeno, fósforo y potasio, que además favorece la capacidad de retención de agua de las plantas y muchos otros beneficios. También, como se mencionó previamente, existen materiales naturales que ayudan a acelerar el proceso de degradación de la materia orgánica y el compost maduro es uno de ellos. Este material se puede agregar como un inóculo de nutrientes y microorganismos o activador natural al compostaje periódicamente, pero es necesario evitar añadirlo en muy grandes cantidades (MITECO, 2009). Un estudio realizado por Young et al., (2020) recomienda agregar de 5,0 % a 7,5 % del peso total de la pila al usarlo como activador biológico.

3.5 Parámetros fisicoquímicos, importantes de monitorear durante el proceso de compostaje

El compostaje es un proceso en el que participa una gran diversidad de microorganismos para la degradación de la materia orgánica, por lo que existe una serie de parámetros importantes de monitorear durante la producción de compost y así generar un producto de calidad, evitando efectos indeseados como consecuencia de una incorrecta gestión. De esta manera, el proceso que se lleve a cabo dependerá en gran medida de las condiciones ambientales, el método de compostaje utilizado y las materias primas empleadas, entre otros, por lo que algunos parámetros pueden variar (FAO, 2013). No obstante, estos deben estar bajo vigilancia para asegurar que se mantengan dentro del rango óptimo. En la **Tabla 3** se señalan los parámetros, su descripción y rangos recomendados para que el proceso se desarrolle de manera exitosa.

Tabla 3*Parámetros fisicoquímicos de control durante el proceso de compostaje*

Parámetros	Descripción
Aireación	Rango ideal (5 % - 15 %)
	El compostaje aérobico requiere de aireación para la respiración de los microorganismos y evitar que el material se compacte. Las necesidades varían durante el proceso, pero se necesita en mayor proporción durante la fase termofílica. La aireación en exceso disminuye la temperatura, provocando pérdida de humedad, por lo que el proceso de descomposición se puede detener. Por el contrario, una baja aireación genera un exceso de humedad y un ambiente de anaerobiosis, lo cual produce malos olores y acidez.
Temperatura	Rango ideal (35 °C - 70 °C)
	La temperatura, es un parámetro que varía según la fase del proceso en la que se encuentre, sin embargo, es necesario saber que, a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y la higienización. No obstante, esta no debe ser demasiado baja ni alta porque en ambos casos se inhibe el proceso de descomposición.
Humedad	Rango ideal (45 % - 60 %)
	La humedad, es otro de los factores de gran relevancia, debido a que es fundamental para la supervivencia de los microorganismos. La humedad óptima es alrededor del 55 %, pero dependerá del tamaño de las partículas y el método utilizado. Si la humedad es insuficiente disminuye la actividad microbiana, lo cual repercute en que la degradación de los residuos no se complete adecuadamente y genera un producto final inestable. Mientras que, si la humedad es demasiado alta el agua tiende a saturar los poros e interfiere en la oxigenación.
pH	Rango ideal (4,5 - 8,5)
	Este factor depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso. El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene un pH óptimo para su crecimiento y multiplicación, sin embargo, la mayor actividad bacteriana se produce entre 6,0 y 7,5, mientras que la mayor actividad fúngica entre 5,5 y 8,0, siendo el rango ideal de 5,8 a 7,2. Según Pérez (2018), durante la fase mesófila este parámetro tiende a disminuir a causa de la producción de aminoácidos. En la fase termófila se vuelve alcalino, debido a la degradación de las proteínas, y en la mesófila 2, baja nuevamente hasta alcanzar valores neutros. Al finalizar el proceso, la Norma Chilena NCh2880 establece un rango recomendado de 5,0 a 7,5.
Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	Rango ideal (15:1 - 35:1)
	La relación C/N varía con respecto al material agregado y se obtiene al dividir el contenido de C (% C total) sobre el de N (% N total) de los materiales a compostar. Si el contenido de carbono es demasiado alto, el proceso tiende a enfriarse y a ralentizarse, mientras que, si hay un exceso de nitrógeno, el material tenderá a calentarse demasiado y generar malos olores por el amoníaco liberado.
Tamaño de partículas	Rango ideal (5 cm - 30 cm)
	Si las partículas son pequeñas, hay una mayor superficie específica, lo que les facilita a los microorganismos el acceso a estas, disminuyendo el tiempo de degradación. Sin embargo, si son demasiado pequeñas puede limitar la aireación al llenar fácilmente de agua los pequeños poros e incidiendo en la compactación del material. Por lo tanto, se recomienda un tamaño desde 5 cm hasta 20 cm o 30 cm.

Nota. Adaptado de Manual de Compostaje del Agricultor, por FAO, 2013.

3.5.1 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

La relación C/N es uno de los factores con mayor importancia en el proceso de compostaje, ya que influye directamente en la calidad del producto final y eficiencia del proceso hasta alcanzar el periodo de maduración (Dume et al., 2023). Durante este ciclo, los microorganismos descomponen la materia orgánica y utilizan carbono y nitrógeno en proporciones específicas para su crecimiento y metabolismo. Una relación C/N adecuada es crucial para mantener una actividad microbiológica estable y eficaz, lo que se traduce en un compost de alta calidad en un tiempo óptimo (Mellado, 2023).

Diferentes estudios y autores han abordado el tema de la relación C/N inicial óptima para el compostaje, y han surgido diversos rangos recomendados. Algunos investigadores respaldan la idea de que una relación C/N de 25-35 es la más adecuada (Akratos et al., 2017; Bohórquez, 2019 y FAO, 2013), mientras que otros mencionan que el rango ideal sería entre 25-30 (Kumar et al., 2010, Xie et al., 2022, Vochozka et al., citado por El-mrini, 2022). Asimismo, el estudio de Onwosi et al., (2017), señala diversos rangos como 25-30, 25-40, e incluso valores entre 25-50, siendo todos recomendados para compostaje bajo diferentes circunstancias. Una relación C/N dentro de estos rangos proporciona un ambiente nutricionalmente equilibrado para los microorganismos, lo que promueve la degradación eficiente de la materia orgánica y acelera el proceso de compostaje.

Por otro lado, a pesar de que algunos estudios han demostrado que el compostaje puede ser efectivo con relaciones C/N iniciales inferiores a 15 (Kumar, 2010). Es importante considerar que un rango de relación C/N demasiado bajo puede conllevar una mayor emisión de amoníaco (NH_3) y una pérdida significativa de nitrógeno, lo que afectaría la calidad del compost final y la eficiencia de los fertilizantes resultantes (Dume et al., 2023). Durante el proceso de compostaje, la relación C/N va disminuyendo gradualmente hasta alcanzar valores cercanos a 10. Esta reducción que se da en la última etapa se debe a que el carbono se está mineralizando y liberando en forma de CO_2 gracias a la respiración celular de los microorganismos, lo que reduce su concentración en el producto final (Richard & Trautmann, citado por Mellado, 2023).

Existen diferentes métodos para calcular la relación C/N inicial de un compost. Uno de ellos es mediante el análisis en laboratorio, pero esto puede ser costoso y poco accesible para muchos. Una alternativa es utilizar modelos matemáticos que requieren datos como la masa húmeda, contenido de humedad, carbono orgánico total y nitrógeno total de los materiales, que pueden obtenerse a partir de publicaciones científicas. Estos modelos permiten estimar la relación

C/N del compost y verificar si se encuentra dentro de los parámetros ideales (Richard & Trautmann, citado por Mellado, 2023).

Además, en diversos documentos sobre compostaje, se pueden encontrar tablas con rangos de valores de relación C/N inicial para diferentes materiales comúnmente usados en el compostaje. A partir de estas, se puede calcular la relación C/N general de la mezcla, donde el uso de calculadoras en línea es una opción para realizar estos cálculos de manera rápida y sencilla. Estas herramientas de cálculo y las tablas con los rangos de valores son muy útiles para aquellos que buscan realizar compostaje, pero no tienen acceso a un laboratorio, permitiendo evaluar la relación C/N inicial aproximada de la mezcla y hacer ajustes si es necesario para lograr un compost que promueva una descomposición eficiente y una alta calidad del producto final.

3.6 Legislación

3.6.1 Marco legal costarricense relacionado con los residuos orgánicos

- Artículo 50. Constitución Política: Este artículo establece el derecho de toda persona a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, siendo responsabilidad del Estado garantizar, defender y preservar este derecho. Esta disposición constitucional respalda la gestión adecuada de los residuos orgánicos, ya que promueve la protección del ambiente y la conservación de los recursos naturales para el bienestar de la sociedad.
- Ley N° 5395. Ley General de Salud: En el capítulo II se establecen las obligaciones y restricciones relativas a la recolección y eliminación de residuos sólidos, mientras que en el artículo 248, se menciona que los residuos deben disponerse de modo que no constituyan una fuente directa o indirecta de contaminación atmosférica, del agua o del suelo, ni elementos de riesgos para la población vecina.
- Ley N° 7554. Ley Orgánica del Ambiente: Procura brindar los instrumentos necesarios para conseguir un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, se establecen acciones para la prevención y control de la contaminación, entre las que menciona que, para el manejo y aprovechamiento de los suelos debe controlarse la disposición de los residuos que constituyan una fuente de contaminación.
- Ley N° 8839. Ley para la Gestión Integral de Residuos: Regula la gestión integral de residuos y el uso eficiente de los recursos mediante la planificación y ejecución de acciones regulatorias operativas, financieras, administrativas, educativas, monitoreo y evaluación para el manejo de los residuos. Considera de manera general la totalidad de residuos, es decir; ordinarios, dentro de los que se incluyen los de tipo orgánico, los de manejo especial y los peligrosos.

- Decreto N° 37567-S-MINAET-H. Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de los Residuos: Se establece con el fin de articular lo establecido en la ley correspondiente, detallando de manera más específica lo que esta demanda, con el fin de prevenir riesgos sanitarios, proteger y promover la calidad ambiental, la salud y el bienestar de la población.
- Decreto N° 36093-S. Reglamento sobre el manejo de residuos sólidos ordinarios: Orientado a regular la gestión específica de los residuos de tipo ordinario, los cuales se consideran de origen domiciliario, comercial e industrial, siempre y cuando posean componentes similares a los generados en viviendas.
- Decreto N° 37745-S. Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos Sólidos Ordinarios: En este decreto se oficializa la metodología a seguir para que las municipalidades que deseen conocer la cantidad y composición de los residuos sólidos ordinarios generados, lo puedan hacer mediante los lineamientos aquí establecidos.
- Decreto N° 39760-S. Oficializa la Estrategia Nacional para la Separación, Recuperación y Valorización de Residuos: El objetivo de este es desarrollar un modelo inclusivo para la gestión integral de los residuos sólidos en el país. Con respecto a los residuos orgánicos se rescatan los siguientes puntos:
 - a) Se destaca la importancia de la valorización de residuos orgánicos y se fomenta la instauración de alianzas público-privadas para lograr su tratamiento de manera integral.
 - b) Se recomienda a las municipalidades poseer al menos tres rutas bien definidas: residuos valorizables, ordinarios (no valorizables) y una ruta específica para la recolección de residuos orgánicos.
 - c) Se recomienda que el camión de recolección de orgánicos posea una cajuela cargada con recipientes plásticos, con el propósito de evitar el vertido de lixiviados durante el transporte al centro de procesamiento.
 - d) La municipalidad, los gestores de residuos y la comunidad deberán contemplar la creación de la infraestructura necesaria para el tratamiento de los residuos orgánicos, esta puede ser asumida por la misma municipalidad, delegada a un tercero o gestionada de forma conjunta municipalidad-empresa privada.
- Decreto N° 33477-S-MP. Declara de interés público y nacional, las iniciativas tendientes a brindar una solución integral al problema de los desechos en nuestro país: En esta declaratoria se establece que es competencia y responsabilidad de los gobiernos locales atender en sus respectivas comunidades todo lo relacionado con el manejo de los residuos sólidos. Mientras

que, instituciones del Gobierno deben colaborar y apoyar a las municipalidades para dar una solución integral al problema.

- Decreto N° 40203-PLAN-RE-MINAE. Gobernanza e implementación de los objetivos de desarrollo sostenible en Costa Rica: Su objetivo es establecer una estructura organizacional para planificar, implementar y dar seguimiento a los 17 ODS, sus 169 metas conexas y a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. A su vez, menciona la responsabilidad de todas las instituciones públicas para colaborar en el cumplimiento de estos objetivos en Costa Rica.
- Política Nacional para la Gestión de Residuos 2010-2021: Se desarrolló para complementar lo establecido en la Ley N° 8839, pues contiene las estrategias para guiar a las instituciones, tanto públicas como privadas, así como organizaciones sociales y la población general en el tema de residuos. Se destaca la importancia de la valorización de residuos, con alta importancia de los residuos orgánicos pues representan más del 55 % de los generados en el país.
- I Plan Nacional de Compostaje 2020-2050: Se desarrolló como una de las iniciativas dentro del I Plan de Acción de la Gestión Integral de Residuos 2019-2022 y su objetivo es “contribuir con la descarbonización, facilitando condiciones en la sociedad para incorporar en la cotidianidad aquellas prácticas que evitarán el envío de materia orgánica a los rellenos sanitarios, lo cual disminuirá las emisiones de metano en estos sitios” (Consejo Nacional Ambiental, 2020, p.36).

3.6.2 Normativa Chilena de calidad del compost

La Norma Chilena de Calidad del Compost, corresponde, a la NCh2880 y tiene como objetivo “establecer la clasificación y requisitos de calidad del compost producido a partir de residuos orgánicos y de otros materiales orgánicos generados por la actividad humana” (Norma chilena de compost [NCh2880], 2004, p.2). Entre los residuos orgánicos que abarca esta normativa se mencionan los agroindustriales, agrícolas, animales, pesqueros, de mercados, de la manutención de parques y jardines, residuos domiciliarios verdes, lodos provenientes de aguas servidas y residuos industriales líquidos y se aplica al compost producido a partir de cualquiera de estos que se pretenda comercializar bajo en nombre de “compost” o sus sinónimos (NCh2880, 2004).

Esta norma posee diferentes requisitos con el fin de clasificar el producto obtenido, entre los parámetros que evalúa se encuentra el pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, y relación C/N. Además, posee máximos permisibles para requisitos microbiológicos (coliformes fecales, Salmonella sp, huevos de helmintos Ova helmíntica, virus MS-2, Listeria monocytogenes, Clostridium perfringens), contenido de nutrientes (fósforo total y soluble, nitrógeno amoniacal y

total, boro, sodio) y metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio, zinc). De acuerdo con los valores obtenidos en los diferentes parámetros que considera, esta norma divide al compost en dos categorías, estas son:

- **Compost Clase A:** Producto de alto nivel de calidad, que cumple con las exigencias establecidas en la norma para el compost Clase A, la cual no presenta restricciones de uso debido a que ha sido sometido a un proceso de humificación, por lo tanto, puede ser aplicado directamente.
- **Compost Clase B:** Producto de nivel intermedio de calidad, que cumple con las exigencias establecidas en la norma para el compost Clase B. Esta clasificación presenta algunas restricciones de uso, donde, para ser aplicado requiere ser mezclado con otros elementos.

IV. Marco metodológico

4.1 Enfoque de la investigación

El presente trabajo tiene un enfoque de tipo mixto, debido a que requiere una combinación entre métodos de recolección y análisis de información tanto cualitativa como cuantitativa. En términos generales, la información cualitativa que se requiere corresponde principalmente a características físicas como olor, color y textura durante el proceso de compostaje, así como las cualidades climáticas del cantón de Pococí y los hábitos de su población en el tema de generación de residuos. Mientras que la información cuantitativa, se enfoca especialmente en las cantidades que se generan de residuos orgánicos tanto en viviendas como en comercios, variaciones de pH y temperatura presentes a lo largo del proceso y resultados de laboratorio fisicoquímicos sobre la calidad del producto final.

A su vez, la inquisición de los datos a considerar incorpora la mezcla de fuentes tanto primarias como secundarias. Las fuentes primarias incluyen la recolección directa de datos originales que pueden provenir de entrevistas, encuestas u observaciones. Las secundarias, proceden principalmente de revisión bibliográfica en la que la información de una fuente primaria ya ha sido procesada y analizada, tales como tesis, documentos o informes técnicos de instituciones oficiales (Maranto y González, 2015). Por su parte, el tipo de estudio corresponde a los tipos descriptivo y explicativo.

El estudio descriptivo, se enfoca en analizar cómo es un determinado tema y sus componentes, donde a través de la recopilación de datos es posible detallar las características y su comportamiento. De esta manera, se pueden dar a conocer conceptos, detallar procesos o describir propiedades relacionadas a los residuos orgánicos y a los procesos del compostaje. Por otra parte,

el estudio explicativo se centra en encontrar las razones o causas que ocasionan ciertos fenómenos, esto es necesario para explicar el patrón de los resultados obtenidos (Vásquez, 2016).

4.2 Alcance de la investigación

El proyecto se llevó a cabo en la zona de Guápiles, distrito central del cantón de Pococí, provincia de Limón, para el periodo 2021-2023. Aunque el objetivo del gobierno local es realizar un sistema de tratamiento de residuos orgánicos para todo el cantón, el proyecto de graduación se centra en el distrito central, de manea que permita obtener resultados que luego puedan ser extrapolados a otros distritos. Para determinar la generación, se definió como población de estudio las viviendas y principales comercios generadores de residuos orgánicos del distrito de Guápiles.

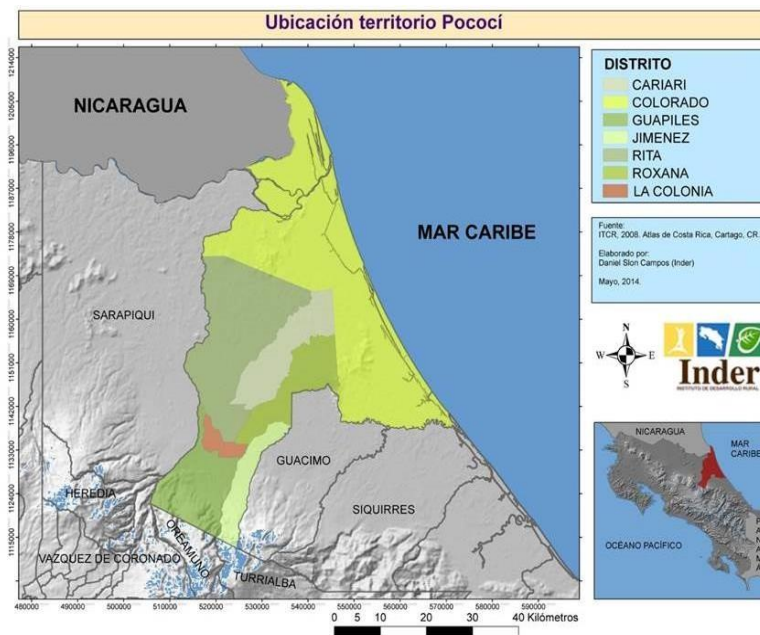
4.3 Proceso metodológico

4.3.1 Caracterización del sitio de estudio

El estudio se desarrolló en el distrito de Guápiles del cantón de Pococí (ver Figura 4), el cual corresponde al número tres de la provincia de Limón. Pococí posee una superficie de 2 403 km² y alberga alrededor de 125 962 habitantes, donde 219,97 km² y 36 469 habitantes pertenecen al distrito de Guápiles (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC], 2011).

Figura 4

Mapa del cantón de Pococí



Nota. Tomado del *Plan Municipal para la Gestión Integral de Residuos del cantón de Pococí 2017-2022*, por la Comisión GIR Pococí, 2017, INDER.

Los límites geográficos de este cantón son los siguientes:

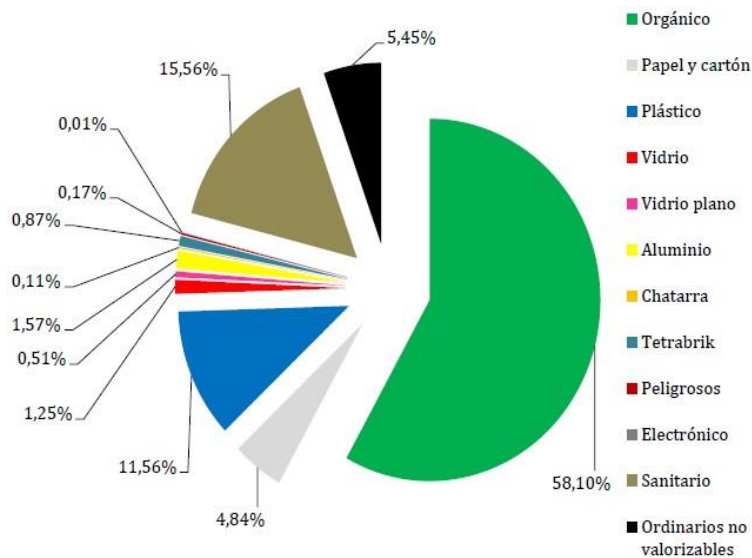
- Norte: República de Nicaragua y el Mar Caribe.
- Oeste: Cantones Sarapiquí y Vázquez de Coronado.
- Sur: Cantones Siquirres, Guácimo, Turrialba y Oreamuno.
- Este: Mar Caribe.

Este cantón se caracteriza por tener un clima húmedo, con altas temperaturas durante todo el año. La precipitación pluvial promedio es de 2 100 milímetros al año y las temperaturas oscilan entre los 24 °C y 33 °C (Comisión GIR Pococí, 2017). El servicio de recolección de residuos sólidos es ejecutado y administrado por la Municipalidad de Pococí, con una cobertura de alrededor del 60 %. El material se dispone en un relleno sanitario privado llamado Los Laureles, ubicado en el distrito de Cariari y es operado por la empresa Corporación Tecnología Magallanes (CTM). La cantidad aproximada de residuos depositados en el sitio es de 150 t/día, incluyendo la recolección municipal, privada y la entrega directa de empresas (Comisión GIR Pococí, 2017).

El comportamiento de la generación de los residuos ordinarios del sector residencial de este cantón se puede observar en la **Figura 5** que se muestra a continuación, la cual presenta los resultados del estudio de Solís (2017), en el que se expone una generación de más del 58 % de los residuos de tipo orgánico; valor que supera el promedio nacional del 53 % acorde a lo establecido por el Informe Estado de la Nación (2019).

Figura 5

Composición porcentual de los residuos sólidos del cantón de Pococí



Nota. Tomado de *Composición porcentual de residuos sólidos urbanos* (p.47), por Solís, 2017.

Además del servicio de recolección de residuos ordinarios, la municipalidad brinda un servicio de residuos valorizables. No obstante, a pesar de que el material valorizable representa el 20,89 % del total generado, debido a la extensión del cantón y a limitaciones técnicas, económicas y de recurso humano, este servicio de reciclaje se brinda únicamente en el Distrito Central de Guápiles y en sectores específicos de Cariari, Jiménez y La Colonia. Sin embargo, en los distritos en que no se ofrece, se realizan campañas de reciclaje mensuales. A causa de esta situación, existen casos de recolectores informales que laboran para empresas privadas, que brindan el servicio en algunos sectores poblacionales (Comisión GIR Pococí, 2017).

Es importante señalar que, aunque la Municipalidad carece de un sistema de compostaje centralizado para tratar los residuos orgánicos, sí cuenta con un programa de compostaje doméstico conocido como Pococí Composta. Este programa municipal tiene como objetivo proporcionar capacitación y apoyo a las familias interesadas en gestionar los residuos orgánicos en sus hogares, además de sortear composteras rotativas para este propósito. A continuación, se detalla el proceso metodológico establecido para el proyecto, el cual se dividió en tres fases asociadas a cada uno de los objetivos específicos.

4.3.2 Fase 1: Determinación de la generación y manejo de residuos orgánicos

Se compone del trabajo de campo realizado para la obtención de información sobre la generación y el tratamiento de residuos orgánicos en los sectores residenciales y comerciales del distrito de Guápiles. Esta fase se dividió en dos etapas, la primera en la aplicación de una serie de encuestas para recolectar información general sobre las viviendas y comercios, así como los tipos de residuos generados y su disposición. La segunda etapa tuvo el propósito de conocer las cantidades generadas en ambos sectores a través de la implementación de un muestreo en campo.

A continuación, se describe la metodología seguida para los procesos más significativos de esta primera fase, la cual, en términos generales sigue los principios de la *“Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios”* elaborada por el Programa de Competitividad y Medio Ambiente (CYMA) en el 2012.

4.3.2.1 Obtención de información sobre viviendas y comercios

Se realizó una revisión y análisis de documentos proporcionados por la municipalidad, dentro de los cuales se destaca el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos 2017-2022 y un estudio de generación y composición de residuos ordinarios llevado a cabo en el año 2018 por parte de Ariana Solís Blandón de la Unidad Técnica de Gestión Ambiental de la Municipalidad de

Pococí. Debido a que este último documento fue realizado recientemente y destaca el importante manejo de los residuos orgánicos como parte de la generación de este distrito, se decidió no efectuar un nuevo estudio, sino priorizar específicamente la generación de residuos orgánicos en el sector residencial y en los principales comercios generadores de estos.

Aunado al análisis de dichos documentos, se complementó la información requerida con datos proporcionados por la Unidad Técnica de Gestión Ambiental y con encuestas realizadas a las viviendas y comercios seleccionados (ver Anexos 4 y 5), las cuales tendrán el propósito de determinar el tipo de residuos orgánicos que se generan, el manejo que se les brinda, la cantidad de habitantes de la vivienda y trabajadores en el comercio, frecuencia de recolección del camión municipal, la evaluación del servicio y sus necesidades, interés de capacitación y el compromiso por formar parte del estudio, etc. Las encuestas se realizaron en el sector residencial del 20 de octubre al 19 de noviembre del 2021, mientras que en comercios del 9 al 16 de febrero de 2022.

Las encuestas elaboradas para la recolección de información se adaptaron de Aguilar (2015) y de la “Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios” (Programa de Competitividad y Medio Ambiente [CYMA], 2012). La metodología para la determinación del número de muestras, así como la selección e identificación de los sitios de estudio se detalla en los siguientes apartados.

4.3.2.2 Determinación del número de muestras

Para determinar la tasa de generación de residuos orgánicos de viviendas y comercios se utilizó como base la metodología de la “Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios”, sin embargo, se adaptó específicamente para la fracción orgánica. Para la toma de la muestra de comercios, se brindó un listado de las patentes comerciales del total de negocios activos, el cual fue de 1 685 comercios y de las viviendas dentro del distrito de Guápiles, con un total de 7 670. No obstante, debido a las necesidades del gobierno local, su enfoque en el sector comercial se dirige específicamente a comercios que, según el tipo de negocio, son considerados los mayores generadores de residuos orgánicos.

Los criterios de selección de la muestra del sector comercial son principalmente dos, el primero, que por sus características se generara un volumen diario significativo de residuos orgánicos en el comercio, por lo que se escogieron las siguientes categorías: procesos de frutas y hortalizas, alimentos congelados, comida rápida para llevar, molino de maíz y derivados,

abastecedor, viveros, verdulerías y fruterías, pizzerías, restaurantes, sodas, cafeterías, carnicerías, cantinas o bares, aserraderos, panaderías y reposterías. El segundo, que los sitios seleccionados se encontraran dentro de la ruta municipal de recolección de residuos ordinarios. A partir del listado de patentes comerciales proporcionado por la municipalidad en formato Excel, se filtraron los sitios que cumplían ambos criterios, resultando en una muestra inicial de 269 comercios. Este número representa la población total de establecimientos activos en el área de estudio. Posteriormente, se calculó la muestra que se utilizaría tanto para la aplicación de las encuestas como para el estudio de generación de residuos orgánicos, para lo cual se utilizó la fórmula de la metodología de CYMA (2012).

Ecuación 1

$$n_{com} : \left(\frac{Z^2 * N_{com} * \delta^2}{(N_{com} - 1) * E^2 + (Z^2 * \delta^2)} \right) * 1,25$$

Donde:

n_{com} = Número de comercios que incluirá la muestra

N_{com} = Número total de comercios activos del cantón

Z = Coeficientes de confianza al 95 % = 1,96

δ = Desviación estándar = 0,5 kg/hab/día

E = Error permisible = 0,15 kg/hab/día

Una vez sustituidas las variables por los datos reales, da como resultado el cálculo que se muestra a continuación:

$$n = \left(\frac{(1,96)^2 * (269) * (0,5)^2}{(269-1) * (0,15)^2 + ((1,96)^2 * (0,5)^2)} \right) * 1,25 = 46,20 = 46 \text{ comercios}$$

Posterior a la obtención de la muestra para comercios, se procede a calcular la muestra para viviendas utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 2

$$n_{viv} : \left(\frac{Z^2 * N_{viv} * \delta^2}{(N_{viv} - 1) * E^2 + (Z^2 * \delta^2)} \right) * 1,25$$

Donde:

n_{viv} = Número de viviendas que incluirá la muestra

N_{viv} = Número de viviendas en el área de estudio

Z = Coeficientes de confianza al 95 % = 1,96

δ = Desviación estándar = 0,3 kg/hab/día

E = Error permisible = 0,05 kg/hab/día

El número total de viviendas que reciben el servicio de recolección de residuos municipal en el distrito de Guápiles es de 7 670 domicilios y la determinación de la muestra se obtuvo a través del siguiente cálculo:

$$n = \left(\frac{(1,96)^2 * (7\ 670) * (0,3)^2}{(7\ 670 - 1) * (0,05)^2 + ((1,96)^2 * (0,3)^2)} \right) * 1,25 = 169,83 = 170 \text{ viviendas}$$

Posteriormente, se procedió a aplicar la función de Excel para seleccionar valores aleatorios, definiendo así los comercios y viviendas que formaron parte del estudio para la fase I. El método de selección de las muestras es del tipo probabilística al azar simple, en donde todos los elementos que conforman la población total tuvieron la misma posibilidad de ser seleccionados (Sampieri et al., 2014).

4.3.2.3 Selección e identificación de los sitios de estudio

Posterior a la elección de los comercios y viviendas, se procedió con un mapeo del área de estudio y con la recopilación de datos generales sobre cada sector mediante las encuestas, según lo recomendado en el apartado A12 sobre la preparación del formulario de la metodología del CYMA (2012), de manera que hiciera posible llevar un adecuado control y seguimiento de la ubicación e información relevante de estos sitios durante el proceso.

En términos generales, se realizó una visita inicial donde se dio a conocer el proyecto, se aplicaron las encuestas y se determinó el interés de la vivienda o comercio por participar del estudio de generación de residuos orgánicos. Posteriormente, una vez que el sitio se comprometió con su participación en el estudio, se les brindó una explicación sobre la adecuada separación de estos residuos, acompañada de un panfleto informativo en el que se detalló la información del estudio y el tipo de residuos que se deben o no separar (Anexo 6), para finalmente marcar en el respectivo croquis el sitio participante y de esta manera reconocerlo en la siguiente visita en la que se recolectaron las muestras del estudio durante la semana correspondiente.

A. Selección e identificación de las viviendas

Una vez obtenida la muestra de viviendas para el estudio de generación de residuos orgánicos, se seleccionarán un total de 25 barrios que conforman el distrito de Guápiles, estos son:

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Sauces | 14. Coopevigua 3.2 |
| 2. San Miguel | 15. Caribeam |
| 3. Palma Dorada | 16. Pinares |
| 4. Santa Cecilia | 17. Urb. Zurquí |
| 5. Llamas del Bosque | 18. Maderos |
| 6. Bovinos | 19. La Emilia |
| 7. Toro Amarillo | 20. Comboy |
| 8. Las Brisas | 21. Campos Verdes |
| 9. La Urba | 22. La Trocha |
| 10. Las Palmas | 23. Palma Dorada |
| 11. Coopevigua 1 | 24. Los Ángeles |
| 12. Coopevigua 2 | 25. Santa Clara |
| 13. Coopevigua 3.1 | |

Cabe destacar que para el estudio no se dividieron los barrios por estratos socioeconómicos, sino que el objetivo fue abarcar una cantidad significativa de barrios con niveles socioeconómicos variados que representaran la realidad general del distrito, tanto por su ubicación como por el nivel de capacidad adquisitiva. No obstante, dentro de los criterios de selección es importante que estos se encontraran dentro de la ruta de recolección municipal y que el nivel de peligrosidad no fuera muy elevado, debido a que durante la etapa de encuestas era importante garantizar la seguridad de las personas encuestadoras.

Posteriormente, se imprimieron distintos croquis que abarcaran a los diferentes barrios, en los que se podían observar las carreteras y la delimitación de los terrenos (Anexo 12). Teniendo los croquis impresos se comenzó con el trabajo de campo, donde la selección de las viviendas se realizó de manera presencial. En esta parte del proceso fue necesario trasladarse a la entrada de cada barrio y ubicar la primera casa, una vez ahí se aplicó la primera encuesta y al finalizarla, se preguntaba a la vivienda si deseaba participar del estudio.

Si la vivienda aceptaba participar, se procedía a marcar, con previa autorización de la persona encuestada, cada sitio de muestreo con una etiqueta que contenía un código (H1-H170).

El propósito de estas etiquetas era facilitar el desarrollo del proceso durante el estudio al mostrar el número del hogar participante en una ventana o lugar visible para su identificación (ver Anexo 7). Una vez marcada la vivienda en el croquis, se contabilizaban cinco casas a partir de esta, y en la sexta se repetía el mismo proceso. En caso de que la vivienda se negara a participar, se repetía el proceso en la vivienda siguiente. De esta manera, se continuaba en cada barrio hasta completar las 170 viviendas de la muestra.

B. Selección e identificación de los comercios

El proceso para la selección e identificación de los comercios se desarrolló de manera distinta al de las viviendas, debido a que desde la toma de la muestra se obtuvo el listado de patentes activas de comercios en el área de estudio. Tras conocer que el valor de la muestra es de 46 y se seleccionan aleatoriamente a través de Microsoft Excel, en donde se conoce el nombre del comercio y su ubicación. Sin embargo, durante la selección aleatoria se identificó que algunos de los sitios elegidos por el programa ya no estaban operativos o se ubicaban fuera de los límites de la ruta de recolección. En respuesta a esta situación, se descartaron y se eligieron nuevos participantes de manera aleatoria hasta completar la muestra.

Seguidamente, se imprimieron distintos croquis divididos por sectores para visualizar los comercios seleccionados y continuar con el trabajo de campo. Durante esta etapa, se visitó cada establecimiento, se aplicó la encuesta correspondiente y se consultó si deseaban participar en el estudio. En caso afirmativo, se entregó el folleto informativo utilizado en las viviendas (ver Anexo 6) y se marcó el sitio en el croquis. Si la respuesta era negativa, se seleccionaba otro comercio de manera aleatoria, repitiendo este proceso hasta completar los 46 establecimientos.

4.3.2.4 Recolección y pesaje de las muestras

En primer lugar, se procedió a analizar la sectorización actual de la ruta del servicio de recolección municipal, la cual se encuentra en el PMGIR-Pococí (2017-2022) acorde a los días de la semana y se puede observar en el **Anexo 3**. Seguidamente, a través de los croquis de las viviendas y los comercios utilizados en las encuestas, así como la marca de los sitios mediante etiquetas adhesivas con su respectivo código (Anexo 7 y 8), las cuales hacen posible facilitar la identificación de los sitios en campo.

El trabajo de campo para la recolección inicialmente se estableció durante una semana, siguiendo las pautas definidas en la frecuencia de muestreo de CYMA (2012), y los días de recolección se programaron según el cronograma del camión municipal en cada barrio o comercio.

Sin embargo, durante el desarrollo del proceso, surgieron diversos inconvenientes que dificultaron la finalización de las muestras en el plazo previsto. Uno de los principales obstáculos fue que muchas personas que se comprometieron a guardar los residuos orgánicos no lo hicieron debido a diversas razones, como la falta de espacio, la dificultad para almacenar este tipo de residuos sin refrigeración, el olvido o el hecho de que algún familiar los desechó accidentalmente. Esta situación complicó el estudio y requirió retomar las encuestas para completar nuevamente la muestra. Como resultado, los períodos de recolección se extendieron a dos semanas, llevando a cabo las recolecciones de las viviendas del 8 al 19 de noviembre de 2021 y posteriormente las de los comercios del 14 al 25 de febrero de 2022.

En cuanto a la recolección de residuos del sector residencial, es importante señalar que el servicio municipal se brinda solo una vez por semana en cada barrio. Por lo tanto, durante el proceso de encuestas se pidió a los participantes que almacenaran los residuos orgánicos generados durante una semana. Estos residuos serían recogidos el día previo a la recolección de los residuos ordinarios, con el objetivo de evitar confusiones y garantizar que las muestras fueran retiradas por el camión designado específicamente para el estudio.

La recolección de residuos se realizó en un camión diferente del que se utiliza en el servicio para residuos ordinarios, con la ayuda de un estudiante practicante del Colegio Técnico Profesional de Pococí (CTPP) y el conductor. La determinación de la generación de residuos en kg de cada vivienda se efectuó el mismo día de la toma de las muestras, para esto, conforme se recogían las bolsas en campo, se etiquetaban con su respectivo código, según lo recomendado en el paso A15 de la metodología CYMA (2012). Luego, las muestras se transportaban al plantel municipal, sitio que consta con las características recomendadas en el mismo apartado. En el lugar se ubicó una balanza para el pesaje de las muestras y los valores se registraron en una bitácora.

En el caso del sector comercial, es necesario tener en cuenta que el servicio de recolección de residuos ordinarios no se brinda con la misma frecuencia para la totalidad de comercios, siendo la mayoría durante todos los días, es decir, de lunes a sábado, y otros únicamente una o dos veces por semana, dependiendo de su ubicación. Sin embargo, a pesar de que la intención inicial es recolectar los residuos orgánicos conforme a la frecuencia del servicio de ordinarios, acorde a lo establecido en la metodología CYMA, una vez en campo se observó que la dinámica de disposición de orgánicos era muy diferente a los demás residuos, por lo que se tuvo que adaptar la recolección a las prácticas de los comercios.

Este cambio surgió principalmente debido a que una gran cantidad de comercios ya separaba los residuos orgánicos y la recolección se efectuaba por un ente privado o por el mismo comercio, dependiendo del uso que se les diera. La frecuencia con la que se disponen este tipo de residuos varía según el comercio. En algunos casos, la disposición es diaria, pero en diferentes horarios, incluso nocturnos, mientras que, en otras ocasiones, los residuos se acumulaban y se disponían dos o tres veces por semana, generalmente con la colaboración de un tercero.

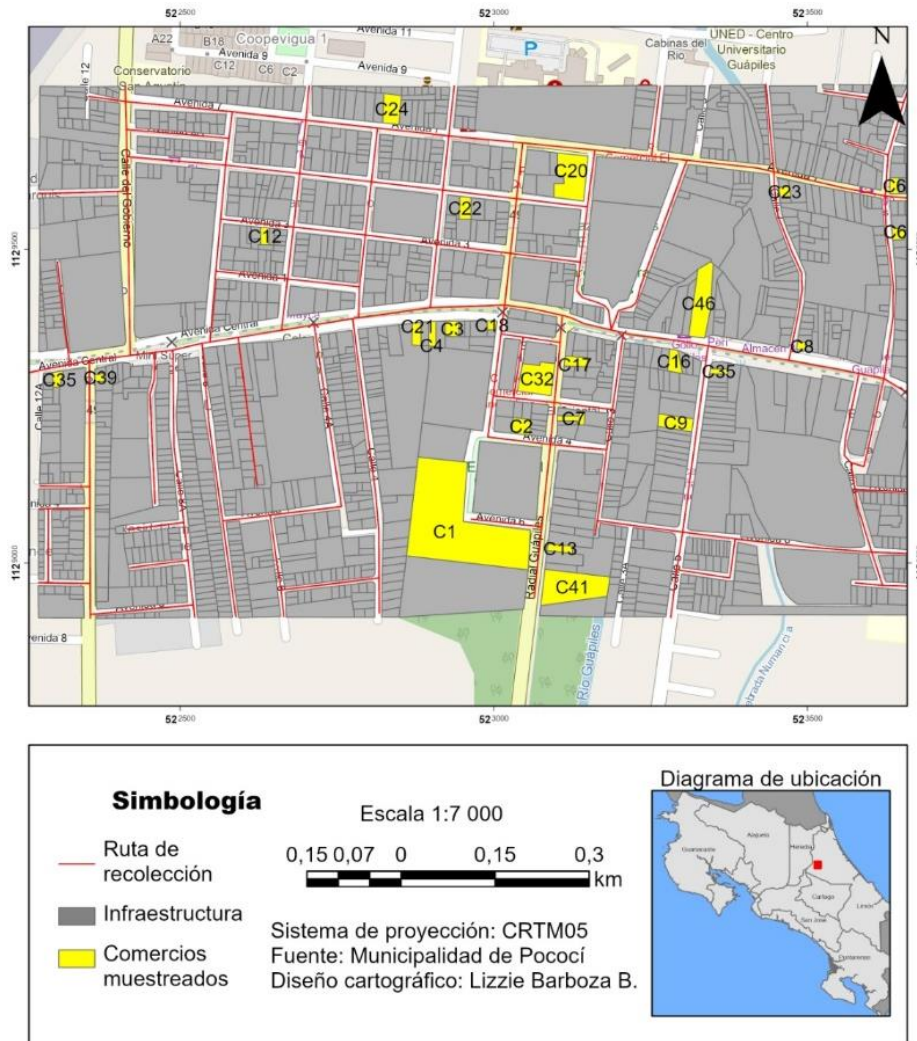
A causa de esta situación, fue necesario coordinar los días y horas de recolección con el comercio durante la semana del estudio, de acuerdo con sus prácticas y necesidades, siendo principalmente en horarios de 8:00 am a 12:00 md. A los comercios que disponen los residuos en el camión de ordinarios que iba al relleno sanitario, se les retiraban las muestras de acuerdo con la metodología inicial planteada utilizando la frecuencia del servicio, retirando los residuos antes de que el camión de ordinarios pasara por la ruta. Sin embargo, para los demás se realizó con métodos alternativos de tratamiento, donde se requirió establecer otros horarios, en los que se pesaban las muestras en campo antes de que fueran utilizadas o entregadas.

Para determinar el volumen de generación, se transportó una balanza para el pesaje directo en campo. Los comercios que no separaban los residuos orgánicos y que se comprometieron a participar, brindaron diariamente lo generado en bolsas para su pesaje. Mientras que, a los que sí separaban estos residuos, se les debió pesar directamente en los recipientes, teniendo en cuenta la diferencia de peso con el recipiente vacío. Cuando no fue posible hacer la recolección para su pesaje, debido a que la disposición se realizaba a horarios nocturnos o fuera del horario municipal, los comercios enviaron los valores diarios obtenidos en kg durante una semana.

Como método alternativo se utilizará el programa ArcGIS 10.1 para la ubicación de la zona de estudio y los puntos de muestreo durante el procesamiento de los datos. La **Figura 6**, presenta un mapa que ilustra algunos de los comercios muestreados en la fase del proceso. En la representación, se observa la disposición de los sitios junto con sus respectivos códigos, especialmente ubicados en el área céntrica del distrito de Guápiles, donde se desarrolla la mayor actividad comercial del cantón.

Figura 6

Mapa de puntos de muestreo tomados en el sector comercial del área céntrica de Guápiles



Nota. Adaptado de *visor catastral de la Municipalidad de Pococí*, por Lizzie Barboza, 2022.

4.3.2.5 Procesamiento y análisis de información

Una vez concluido el trabajo de campo del estudio correspondiente al primer objetivo, se realizaron los cálculos pertinentes respecto a la generación total por día de los comercios y viviendas muestreadas, la generación per cápita de los residuos y el cálculo de la desviación estándar. Así como el procesamiento de las respuestas obtenidas de las encuestas a través de gráficos y cuadros, tales como principales residuos orgánicos generados, tipo de disposición actual, valoración del servicio, necesidades o interés en capacitación, entre otras, para finalmente realizar un análisis y discusión de los resultados obtenidos.

El análisis de la información se llevó a cabo mediante el uso de Microsoft Excel, que permite una sistematización detallada y la creación de gráficos para representar los datos recopilados en las encuestas y los parámetros medidos en las distintas fases del estudio. Se emplearon diversas funciones de Excel para determinar variaciones, medidas y frecuencias, lo que facilitó el análisis estadístico. Además, la generación de gráficos y diagramas de distribuciones y tendencias contribuyeron a una comprensión más clara de los patrones de comportamiento en la población estudiada.

4.3.3 Fase 2: Evaluación de la viabilidad de implementación de los métodos de compostaje

A continuación, se describe la metodología de enfoque experimental y documental para el análisis del sistema de compostaje y sus variaciones, la cual se dividió en tres principales apartados: pre-campo, campo y evaluación del producto final. El objetivo fue determinar qué inóculo ayuda a elaborar un compostaje de mejor calidad nutricional y/o un menor tiempo de descomposición. Las pruebas se realizaron en campo bajo condiciones controladas, manipulando las variables independientes para evaluar su efecto en las dependientes.

4.3.3.1 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental, debido a que busca probar una hipótesis a partir de la relación causa (variable independiente) – efecto (variable dependiente), en el cual la variable independiente será manipulada (Hernández, et al., 2017). En el caso de este estudio, las variables dependientes e independientes se describen en la Tabla 4 presentada a continuación:

Tabla 4*VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO*

Tipo de Variable	Definición	Variables
Dependiente	Corresponden a los diferentes parámetros medidos para conocer el comportamiento y la calidad de las pilas y que se ven afectadas por las variables independientes.	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura. • Potencial de hidrógeno (pH). • Relación Carbono/Nitrógeno (C/N). • Macroelementos primarios: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). • Macroelementos secundarios: calcio (Ca) y magnesio (Mg). • Microelementos: hierro (Fe), manganeso (Mn), cromo (Cr) y zinc (Zn).
Independiente	Son los factores que se manipulan o controlan para observar su impacto en las variables dependientes.	<ul style="list-style-type: none"> • Burucha de madera. • Microorganismos de Montaña (MM). • Compost maduro. • Aireación. • Humedad.

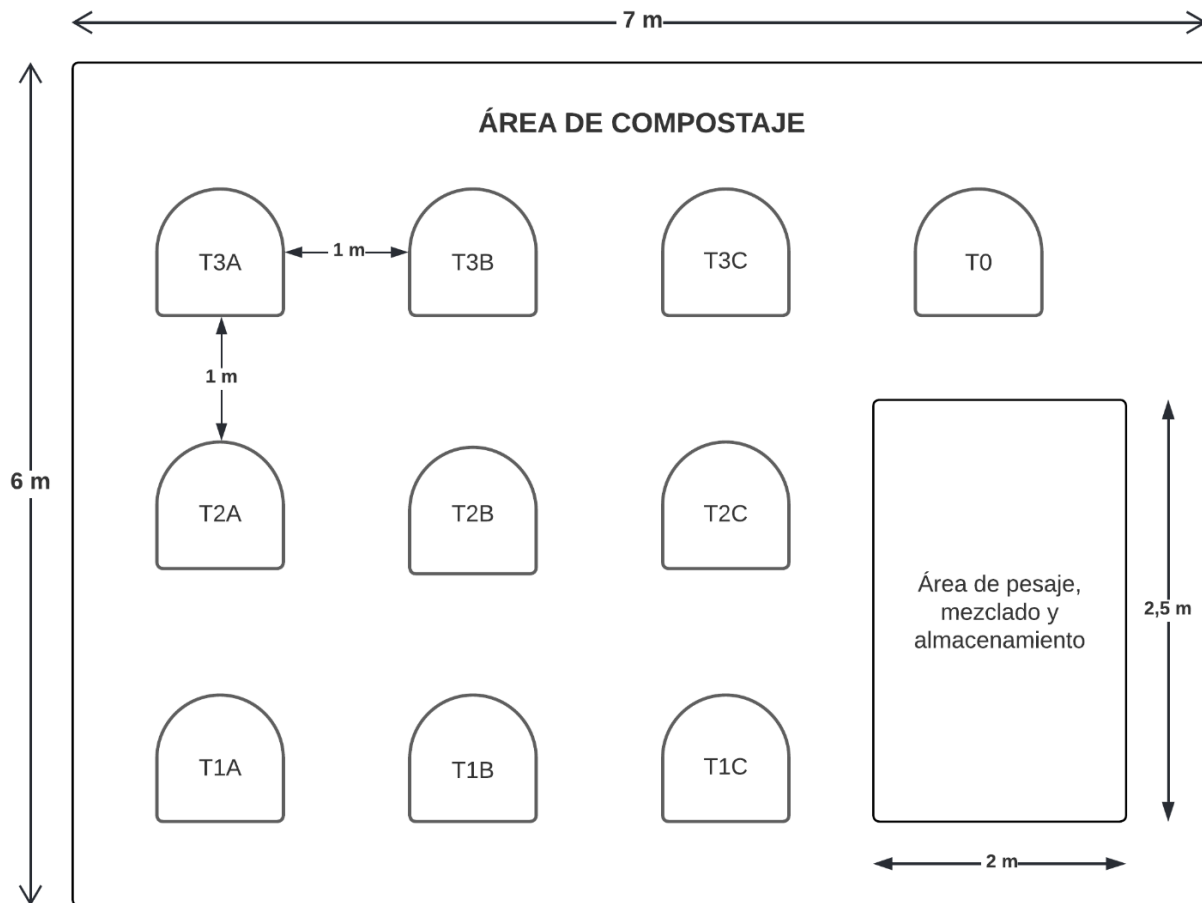
Nota. Adaptado de *Metodología de la investigación*, por Hernández, et al., 2017, Universidad Florentino del Castillo (UCA).

Las pruebas de campo de compostaje evaluaron el método de pilas con volteo manual con tres variaciones y una de control o testigo. Las variaciones fueron determinadas por la adición de diferentes aceleradores naturales del proceso, estos fueron: MM en polvo, compost maduro y un tercero que incorpora ambos, tanto MM como compost maduro. Paralelamente, se llevó a cabo un sistema de control sin ningún aditivo, el cual tuvo el propósito de medir las interacciones de comportamiento en el tiempo de las variables dependientes, a partir de la manipulación de las variables independientes. Cada método fue implementado en triplicado, como se muestra en el diseño experimental de la **Figura 7**, durante el periodo comprendido entre junio y agosto de 2023, y se detalla a continuación:

- Número de tratamientos: tres (3).
- Número de repeticiones por tratamiento: tres (3).
- Número de control o testigo: uno (1).
- Cada unidad experimental se conformó en iguales proporciones por una base de burucha de madera y residuos orgánicos domiciliarios y comerciales.

Figura 7

Diseño experimental de las pruebas de compostaje



Donde:

- Tratamiento 0 (T0): Variable de control.
- Tratamiento 1 (T1A, T1B, T1C): Se agregan MM.
- Tratamiento 2 (T2A, T2B, T2C): Se agrega compost maduro.
- Tratamiento 3 (T3A, T3B, T3C): Se agregan MM y compost maduro.

Cada pila es conformada por una base de 50 % (50 kg) de residuos orgánicos provenientes de viviendas y comercios y 50 % (6 kg) de material seco, para el cual se utilizó burucha de madera, así como por los respectivos insumos de tratamiento evaluados como aceleradores y aportadores nutricionales del proceso. Los detalles sobre la composición de las pilas se desarrollan en el apartado “5.3.3.3.2 *Etapa de campo: Formación y composición de las pilas de compostaje*”. Las características del área experimental son las siguientes:

- Forma de la compostera: Montículo
- Altura de la pila: 0,30 m
- Diámetro de la pila: 0,38 m
- Distancia entre hileras: 1 m
- Peso de cada una de las pilas: 56 kg - 60 kg

4.3.3.2 Procedimiento

A continuación, se describen los pasos del procedimiento de las pruebas de compostaje para el objetivo 2, dividido en tres etapas. La primera, llamada "Etapa pre-campo", abarca la recopilación de elementos necesarios para la etapa siguiente, conocida como "Etapa de campo". En esta última, se detallan los procesos para la recolección de residuos orgánicos, la formación de pilas y la toma de mediciones en el área de estudio. La última fase, "Evaluación del producto final", explica los métodos empleados para analizar los datos y las variaciones en el compostaje sometido a prueba.

4.3.3.2.1 Etapa pre-campo

Recopilación de información

Inicialmente, esta fase se centró en la evaluación de documentación sobre sistemas centralizados de compostaje para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos, implementados en otras regiones nacionales e internacionales. Posteriormente, se continuó con revisión bibliográfica sobre el método de compostaje a evaluar con sus respectivas variaciones, es decir, el compostaje de pilas con volteo manual y la adición de aceleradores naturales del proceso como MM y compost maduro, con el fin de determinar las proporciones adecuadas de los insumos necesarios para la formación de las pilas y las prácticas requeridas durante el proceso.

La recolección de información se complementó con entrevistas a profesionales en Ingeniería en Agronomía o con experiencia en proyectos relacionados, como el Ingeniero Agrónomo Oswaldo Páez. Asimismo, se llevaron a cabo encuestas a las municipalidades de Alvarado, Jiménez, San Rafael de Heredia y Tilarán mediante reuniones virtuales. Estas actividades permitieron evaluar diversas experiencias y comparar los sistemas, procedimientos, requisitos económicos, materiales y humanos. El propósito fue establecer los lineamientos para desarrollar una propuesta que se adapte a la cantidad y composición de los residuos generados en el distrito de Guápiles, considerando también las condiciones ambientales y económicas.

Requerimientos de materiales, insumos y equipos necesarios para las pruebas

Antes de comenzar con las pruebas fue necesario adquirir y preparar una serie de materiales y equipos importantes durante la ejecución de las diferentes etapas del proceso. Algunos de los materiales eran requeridos para facilitar las actividades técnicas, de seguridad o limpieza, mientras que otros fueron necesarios como insumos en la formación de las pilas o como equipos de medición. En la **Tabla 5** se menciona cada uno y las cantidades generales solicitadas, no obstante, en el apartado “5.3.3.2.2 *Etapas de campo*” (Tabla 9) se definen con mayor detalle las cantidades de insumos que fueron requeridas en el proceso.

Sobre los insumos para la formación de las pilas, se establecieron las cantidades tomando como referencia la relación C/N, revisión bibliográfica y el criterio del experto, dado por el Ing. Agrónomo Oswaldo Páez. La base de RO establecida de 50 kg por cada pila, lo cual determinara la cantidad de los demás insumos. Primeramente, el experto Páez, O. (comunicación personal, 2022), recomienda conformar las pilas tomando en cuenta el volumen y la relación C/N inicial, sugiriendo que la composición se dé en un 50 % de RO frescos y un 50 % de burucha, en términos de volumen, siempre y cuando esta proporción cumpla con una relación C/N de alrededor de 35/1 y que no exceda los 40/1.

No obstante, debido a que aún se desconocía el valor del volumen de los insumos, con el uso de la revisión bibliográfica se calcula una primera relación C/N para determinar diferentes cantidades de burucha, con el fin de obtener una estimación al solicitar los materiales. Los cálculos determinaron que la proporción adecuada para cumplir con la relación C/N corresponde aproximadamente al 10% de burucha respecto a la cantidad de RO. Por lo tanto, para los 500 kg de RO se requieren alrededor de 50 kg de burucha, es decir, 5 sacos. Sin embargo, se debió solicitar el doble en caso de que en la formación de las pilas o durante el proceso se observara la necesidad de agregar más.

En el caso del compost maduro, se determinó una adición del 7,5 % del peso total de la pila, siguiendo lo establecido por Young et al., (2020). Siendo necesarios más de 41 kg sólo para la formación de las pilas, por lo que se solicitaron 2 sacos de 30 kg cada uno, con el objetivo de tener la suficiente cantidad para todo el proceso, tomando en cuenta las adiciones durante los volteos. Finalmente, Páez (2020) recomendó adquirir un paquete de MM el polvo de 500 g para agregar 2 cucharadas tanto durante la formación como en los volteos a las pilas que lo requieran.

Tabla 5*Materiales, insumos y equipos requeridos para las actividades en el proceso*

Materiales de apoyo	
1 carretillo metálico grande	1 tamizador
2 palas	1 bitácora
2 estañones 100 L	1 paquete de bolsas de basura jardineras
1 wincha	10 recipientes para toma de muestras
Malla de sarán	Agua destilada
Materiales de limpieza	
1 manguera	1 escoba
1 paquete de jabón biodegradable en polvo	Jabón de manos
1 cepillo de limpieza	Gel antibacteriano
Insumos para la formación de las pilas	
500 kg de residuos orgánicos	1 paquete de MM en polvo
10 sacos de burucha de madera	1 galón de melaza
60 kg de compost maduro	
Equipos de medición	
1 balanza eléctrica de 200 kg	pH-metro
1 termómetro	
Equipo de protección	
1 par de botas de hule	1 par de lentes de seguridad
1 caja de guantes	1 paquete de mascarillas

La mayoría de los materiales fueron proporcionados por la municipalidad, que ya contaba con estos para el desarrollo de sus actividades diarias, con excepción de los insumos para la formación de las pilas. Los residuos orgánicos “verdes” con principal aporte de nitrógeno se solicitaron a viviendas y comercios. La metodología para la recolección se describe con mayor detalle en el punto “5.3.3.2.2 *Etapa de campo: Recolección de muestras de residuos orgánicos*”.

Por su parte, para el material seco o “café” encargado de aportar mayoritariamente carbono, se utilizó burucha de madera obtenida de un aserradero de la zona que estuvo dispuesto a donarlo. En el caso del compost maduro como acelerador del proceso, inicialmente se planteó la donación del producto de otro proyecto municipal para el tratamiento de RO, pero esto no fue posible, por lo que se adquirió un abono orgánico comercial como sustituto, el cual se muestra en la **Figura 8**.

Figura 8

Abono orgánico utilizado como compost maduro



Al igual que el abono orgánico mostrado en la figura anterior, la melaza fue adquirida en la tienda Colono Agropecuario, mientras que los MM, se adquirieron de una pequeña empresa llamada OPA Natura que elabora bioinsumos agropecuarios. A continuación, se detalla el cálculo de la relación C/N inicial usando las cantidades finales utilizadas, las mismas se describen a mayor detalle en el apartado “5.3.3.2.2: Formación y composición de las pilas de compostaje”.

Cálculo de la Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

Con el fin de conocer la relación C/N inicial de las pilas de compostaje, se utilizaron dos métodos para su cálculo. Estos se desarrollaron a partir de material bibliográfico, debido a que no fue posible analizar los diferentes insumos en un laboratorio para obtener el valor exacto de la mezcla.

A. Primer método: Uso de tablas con valores promedio de relación C/N para cada material

La primera metodología se basa en la utilización de tablas con los valores de los materiales que componen la mezcla. A partir de estos datos, se calcula el valor general mediante una serie de pasos sencillos. Para este propósito, se analizaron diversos documentos que proporcionaron los valores de C/N inicial de insumos utilizados en el compostaje y se seleccionaron siete fuentes de información que contenían los tres materiales necesarios, indicados en la *Tabla 6*. Algunos de estos

comparten valores o rangos similares, mientras que otros muestran diferencias significativas, ante esto, se calculó el promedio general de las fuentes que fueron seleccionadas.

Tabla 6

Relación C/N de los materiales utilizados en la composición de las pilas

Residuos de frutas y verduras		Restos de alimentos cocinados		Aserrín o astillas de madera		Fuente
Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	
10-20	15	15-25	20	500-1000	750	Chavarri et al., 2005
32	32	15	15	223	223	Universidad de Cornell, 1996 & Rynk et al, 1992, citados por Condado de Klickitat, s.f.
35-40	37,5	15	15	6-700	353	Casco (2015)
10-20	15	15-20	17,5	200-600	400	Instituto Nacional de Aprendizaje [INA], (s.f)
35	35	15-20	17,5	500	500	Yugsi (2011)
35	35	15	15	200-500	350	Mula (2012)
40	40	19	19	400	400	Sepúlveda y Alvarado (2013)
-	29,9	-	14,9	-	425,1	-

La tabla presenta dos tipos de residuos orgánicos "verdes" que son principalmente ricos en nitrógeno: alimentos crudos y cocinados, dispuestos en columnas separadas. El estudio de generación llevado a cabo en el objetivo 1 reveló que estos residuos son los más abundantes en la población estudiada del distrito. Sin embargo, debido a sus valores iniciales de C/N considerablemente diferentes, se optó por incorporarlos por separado, siguiendo la recomendación de Casavilca (2022).

Los residuos de frutas y verduras presentan una relación más alta debido a su contenido de fibras y celulosa, que aportan mayores cantidades de carbono en comparación con residuos ya cocinados. Además, es importante tener en cuenta que, aunque el promedio para el aserrín es de 425, el INA sugiere considerar un tercio de este valor al realizar el cálculo, debido a que es el área disponible para las bacterias en materiales como la burucha o astillas de madera. Considerando la información anterior, en la **Tabla 7** se detallan los datos a utilizar para el cálculo con el primer método.

Tabla 7

Datos utilizados para el cálculo de la relación C/N inicial con el primer método

Material	Cantidad (kg)	Relación C/N
Restos de frutas y verduras	25	30/1
Desperdicios de cocina	25	15/1
Burucha de madera	6	142/1

Se puede definir que la base de cada pila de compostaje es de 56 kg, lo cual se considera el 100 % del peso. Posteriormente, es necesario conocer el porcentaje de cada uno de los componentes, lo cual se determina de la siguiente manera:

- Porcentaje de frutas y verduras / desperdicios de cocina:

$$\% \text{ de RO} = \frac{25 \text{ kg}}{56 \text{ kg}} = 0,4464 * 100 = 44,64 \%$$

Debido a que ambos tipos de materia orgánica se agregan en la misma proporción, poseen el mismo porcentaje para el cálculo, únicamente cambia el valor de relación C/N de cada material.

- Porcentaje de burucha:

$$\% \text{ de burucha} = \frac{6 \text{ kg}}{56 \text{ kg}} = 0,1071 * 100 = 10,71 \%$$

Después de conocer el porcentaje de cada material solo se multiplica cada uno por su valor de C/N inicial y la suma de los tres será el total de la relación C/N inicial de las pilas.

- Restos de frutas y verduras = $0,4464 * 30 = 13$
- Desperdicios de cocina = $0,4464 * 15 = 7$
- Burucha = $0,1071 * 142 = 15$
- $C/N_{\text{Total}} = 13 + 7 + 15 = \mathbf{35}$

El procedimiento anterior se desarrolló tomando como base la metodología planteada por las concejalías de Agenda Urbana y Espacio Agrario y Sostenibilidad (s.f), de Lérida, España.

- B. Segundo método: Uso de calculadora online teniendo los porcentajes de carbono, nitrógeno y humedad de cada material

Este método utiliza una tabla como referencia que posee los valores a utilizar en el cálculo, sin embargo, los datos necesarios son diferentes y se obtienen únicamente a través de una fuente de información que se muestra en la **Tabla 8**, a continuación:

Tabla 8

Datos utilizados para el cálculo de la relación C/N inicial con el segundo método

Material	Cantidad (kg)	% Humedad	% Carbono	% Nitrógeno
Restos de frutas y verduras	25	80	56	1,4
Desperdicios de cocina	25	69	34,95	1,875
Burucha de madera	6	10	40	0,1

Nota. Adaptado de *Manual de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos a través de Sistemas de Compostaje y Lombricultura en el Valle de Aburrá*, por Sepúlveda y Alvarado, 2013.

Teniendo los datos anteriores se realiza el cálculo utilizando la calculadora de relación C/N inicial online de la Universidad de Cornell, la cual requiere únicamente la inserción de los datos mostrados en el cuadro anterior y da como resultado la relación C/N (Figura 9):

Figura 9

Calculadora online de relación C/N inicial de la Universidad de Cornell

Ingrediente	% H2O	Peso	% Carbono	% Nitrógeno	Relación C/N
Residuos de frutas	80	25	56	1.4	
Desperdicios de c	69	25	34.95	1.875	
Aserrín	10	6	40	0.1	
				Resultado:	34.7448603953

Nota. Adaptado de *Calculate C/N Ratio for Three Materials*, por la Universidad de Cornell, 1996, Cornell Composting (<https://compost.css.cornell.edu/calc/2.html>).

Se puede observar que el valor redondeado para la relación C/N inicial es de **35**, el cual concuerda con el cálculo de la primera metodología utilizada. La calculadora online desarrollada por la Universidad de Cornell toma como base la siguiente fórmula:

Ecuación 3

$$R = \frac{Q1(C1 * (100 - M1) + Q2 (C2 * (100 - M2) + Q3 (C3 * (100 - M3) + \dots}{Q1(N1 * (100 - M1) + Q2 (N2 * (100 - M2) + Q3 (N3 * (100 - M3) + \dots}$$

Donde:

R = Relación C/N de la mezcla de abono.

Qn = Masa del material (“tal cual” o “peso húmedo”)

Cn = Carbono (%) del material n.

Nn = Nitrógeno (%) del material n.

Mn = Contenido de humedad (%) de material n.

Por lo tanto, el cálculo de la relación C/N inicial una vez obtenidos los datos de humedad, carbono y nitrógeno para cada material pueden realizarse a través de calculadoras online desarrolladas específicamente para esto o haciendo uso de la fórmula.

Acondicionamiento del área experimental

Las pruebas se realizan en un área proporcionada por la municipalidad ubicada en el Plantel Municipal de 7 m de largo y 6 m de ancho, para un total de 42 m², de los cuales 37 m² utilizados para la ubicación de las pilas y los 5 m² restantes para mezclar los residuos orgánicos frescos, realizar los pesajes y colocar los diferentes materiales de apoyo. El sitio posee la superficie del suelo de cemento y cuatro columnas que sostienen el techo y las paredes, sin embargo, tres de los cuatro lados estaban abiertos hasta 1,5 m de altura y el cuarto es totalmente abierto.

La alta presencia de precipitaciones en el distrito de Guápiles fue un factor importante a tomar en cuenta para el desarrollo del proceso de compostaje, por lo cual, una vez iniciado el proceso experimental se pudo observar que las paredes abiertas permitan que las lluvias con viento alcancen la ubicación de las pilas, por lo que fue necesario cerrar con una malla de sarán para evitar el exceso de humedad, tal y como se muestra en la **Figura 10**. Asimismo, conforme el paso de los días se observó la presencia de animales en el sitio, estos alteraban la estructura de las pilas, por lo que resultó necesario construir un portón en la entrada que impidiera el ingreso.

Figura 10

Acondicionamiento del área experimental



Asimismo, se tuvieron que almacenar los materiales en una bodega protegida de la lluvia cercana al sitio, de manera que al iniciar con la etapa de campo se encontrara todo lo necesario para continuar con el proceso. La ubicación, diseño y dimensiones del lugar son apropiados para realizar las pruebas, una vez protegido de las lluvias y del ingreso de animales no se necesitó hacer más modificaciones.

4.3.3.2.2 Etapa de campo

Recolección de las muestras de residuos orgánicos

Se denomina "muestra" a la cantidad necesaria de residuos orgánicos del sector residencial y comercial de Guápiles para llevar a cabo las pruebas de compostaje. Las pruebas incluyen un total de 10 pilas, cada una compuesta por 50 kg de RO, por lo que se necesita una muestra de 500 kg. La recolección de estos residuos se realiza el 12 de junio de 2023 en los comercios y viviendas participantes en el estudio de generación durante la fase I. Durante esta etapa, se registraron las cantidades generadas por cada comercio y vivienda en tablas de Excel para el análisis.

Para completar la muestra, se busca representar el 60 % del sector comercial y 40 % del residencial. Se estimó el número de sitios necesarios según el promedio de las cantidades generadas anteriormente, obteniendo así una estimación de lo que podía recolectarse si los lugares seleccionados participaran. En los comercios, se promedió la generación diaria en la fase I y se les solicitó donar los residuos orgánicos que generaran. Al aceptar, debían indicar el número de días

que recolectarían, permitiendo calcular el promedio acumulado para cubrir el 60 % de la muestra. Se seleccionaron 18 comercios, incluyendo panaderías, restaurantes, supermercados, sodas y verdulerías, y se contó con el apoyo de la feria del agricultor y las fiestas patronales.

En cuanto al sector residencial, se tomaron en cuenta tres factores para su selección acorde a la información registrada en la base de datos: número de personas participantes por barrio, cantidad de kg obtenida por vivienda, interés de la población en el estudio. Durante el desarrollo de la fase I se comentó sobre las pruebas de compostaje y previamente se seleccionan algunas viviendas que deseaban seguir participando. Asimismo, se tomaron en cuenta los barrios en los que hubo una mayor tasa de participación y/o volumen obtenido, seleccionando así un total de cinco barrios y 55 viviendas, que se estimó que completaban el 40 % de la muestra. Los barrios seleccionados fueron: Sauces, San Miguel, Palma Dorada, Los Ángeles y Santa Clara.

Posteriormente, se contactó a los encargados de cada vivienda que había confirmado su colaboración para verificar si todavía existía la disposición de participar y brindar los detalles sobre la recolección, incluyendo fecha, tipos de residuos y métodos de almacenamiento. Una vez confirmados los sitios participantes, tanto de viviendas como de comercios, con los datos obtenidos de la fase 1 se estimaron las cantidades necesarias para superar los 500 kg de muestra, garantizando así suficientes residuos para la formación de pilas. En caso de que la recolección coincidiera con el horario regular de recolección municipal, se solicitó a las viviendas etiquetar las bolsas de muestra y se informó a los recolectores para evitar que fueran llevadas al relleno sanitario por error. La **Figura 11** muestra algunos ejemplos de las muestras recolectadas.

Figura 11

Muestras de RO recolectadas en viviendas



La recolección se programó para un solo día, debido a que las pruebas inician al día siguiente con el propósito de evitar que los residuos comiencen a descomponerse. La cantidad

esperada hizo necesario utilizar un camión grande que pudiera recolectarlos y transportarlos hasta el sitio en que se realizaran las pruebas. La recolección no se hizo con el mismo camión utilizado durante el estudio de generación, debido a que su tamaño y forma no permitía almacenar la cantidad necesaria. Por lo tanto, se contó con el apoyo de uno de los camiones recolectores de residuos ordinarios que utiliza la municipalidad para brindar el servicio (Figura 12).

Figura 12

Camión utilizado para la recolección de los RO



Los residuos se recibieron en bolsas plásticas, en el caso de las viviendas o comercios que generaron menos de 10 kg, se pesaron en campo y posteriormente se vertieron directamente en el camión (ver Figura 13), mientras que los que generaron mayores volúmenes se pesaron en sus recipientes e igualmente son vertidos en el camión, devolviendo el envase al sitio correspondiente. El pesaje de los residuos se hizo para conocer la cantidad obtenida de cada uno de los sectores y el vertimiento de residuos en el camión facilitó las labores de mezclado y picado, así como la recolección del exceso de lixiviados.

Figura 13

Recolección de los RO en el camión municipal



Formación y composición de las pilas de compostaje

Una vez obtenida la cantidad necesaria de material orgánico, se procedió con la formación de las pilas, la cual se realizó un día después de la recolección, es decir, el 13 de junio de 2023. Primeramente, los residuos contenidos en bolsas se vertieron directamente en el camión y se mezclaron, con el fin de que los distintos tipos, tanto cocinados como frescos, provenientes de viviendas y comercios, quedaran mezclados uniformemente. El proceso de mezclado se realizó en el camión recolector en el que se transportaron las muestras, ejecutándose de forma manual y mecánica, tanto con la utilización de una pala como con ayuda de la compactadora del camión.

Después de la etapa de mezclado, se procedió a triturar los sólidos gruesos manualmente utilizando herramientas como pala y machete, con el objetivo de obtener un tamaño de partícula óptimo entre 5 cm y 30 cm. Este tamaño favorecería una mayor superficie específica, lo que facilitaría el acceso de los microorganismos al sustrato y, por consiguiente, aceleraría el proceso de compostaje (FAO, 2013).

Al finalizar la mezcla y trituración, se agregó una parte de los residuos en un estañón hasta completar 50 kg y en otro del mismo tamaño se procedió con el pesaje de un volumen de burucha equivalente al ocupado por los 50 kg de RO. Lo anterior debido a que cada sistema es compuesto por un volumen del 50 % de RO frescos y el otro 50 % por insumo seco, siguiendo la recomendación experta de Páez, O (comunicación personal, 2022). Una vez obtenido el peso exacto ocupado por el volumen de la burucha para una relación 50-50, se comprobó que la relación C/N inicial se mantenía dentro del rango adecuado, por lo que se conformaron las pilas con una

proporción de 50 kg de residuos frescos y 6 kg de burucha como base, además de los insumos adicionales para cada tratamiento.

Luego del pesaje, los insumos se mezclaron uniformemente para asegurar un proceso adecuado de degradación y control de humedad de las pilas. Primero se formó la pila de control (T0), en la cual se mezclaron únicamente los RO y la burucha. Seguidamente, se crearon tres pilas T1, a cada una de las cuales se le añadieron dos cucharadas de MM en polvo, equivalentes a 8 g, según la recomendación del experto Páez, O (comunicación personal, 2022). Posteriormente, se establecieron las tres pilas T2, en las que se agregó un 7,5 % de compost maduro del peso total, es decir, 4,2 kg por cada pila, siguiendo la metodología sugerida por Young et al. (2020). Finalmente, se formaron las tres pilas T3 con ambos insumos, es decir, 2 cucharadas de MM y 4,2 kg de compost maduro cada una. El resumen de cada tratamiento se muestra en la **Tabla 9** y en la **Figura 14**, una secuencia de fotografías que resume el proceso de formación de las pilas de compostaje.

Tabla 9

Cantidades de insumos utilizados en la formación de las pilas por cada tratamiento

Tratamiento	Insumo	Cantidad
T0	R.O domiciliarios y comerciales	50 kg
	Burucha de madera	6,0 kg
T1	R.O domiciliarios y comerciales	50 kg
	Burucha de madera	6,0 kg
	MM en polvo	8,0 g
T2	R.O domiciliarios y comerciales	50 kg
	Burucha de madera	6,0 kg
	Compost maduro	4,2 kg
T3	R.O domiciliarios y comerciales	50 kg
	Burucha de madera	6,0 kg
	MM en polvo	8,0 g
	Compost maduro	4,2 kg

Figura 14

Secuencia del proceso de formación de las pilas de compostaje

1. Mezclado de los RO



2. Trituración



3. Pesaje de los insumos



4. Adición de compost maduro



5. Adición de MM



6. Mezclado de las pilas



Al finalizar cada montículo, se mezclaron uniformemente con una pala para que los aceleradores naturales actúen de manera más eficiente en la totalidad de la pila. Una vez concluida la formación, se midieron sus dimensiones de largo, alto y ancho con una wincha. Cada pila presentó 38 cm de diámetro y 30 cm de altura, separados por pasadizos de 1 m. El conjunto de pilas se protegió con un plástico para evitar la incidencia de los rayos solares de forma directa e impedir el aumento de la humedad durante las lluvias, de manera que se conservara la temperatura deseada (Pérez, 2018).

Una vez finalizado el proceso de formación de las pilas, según la composición y cantidades correspondientes a cada tipo, las pilas se cubrieron con plásticos sujetos por piedras en sus esquinas para evitar la incidencia directa del sol, lluvia o posibles animales. De esta manera, se puede observar en la **Figura 15**, las pilas luego de concluir el proceso. Se puede visualizar en la imagen de la izquierda la presencia de gran cantidad de sólidos orgánicos de gran tamaño que todavía no inician el proceso de descomposición. En la imagen de la derecha se aprecian las pilas formadas y cubiertas con plástico debido a que el sitio no se encuentra acondicionado con sarán.

Figura 15

Aspecto de las pilas de compostaje el primer día después de su formación



Volteo y riego

Los volteos se realizaron de forma manual utilizando una pala, con una frecuencia de una vez por semana durante las primeras cuatro semanas. Posteriormente, se continuaron realizando quincenalmente hasta la finalización del proceso, a menos de que un alto valor en la temperatura, que superara los 70 °C o un exceso de humedad y compactación indicara la necesidad de realizar

un volteo adicional (FAO, 2013). El primer volteo se realizó a los 8 días y debido a la alta humedad que presentaban las pilas se agregaron dos cucharadas de los MM a las pilas T1 y T3 y 1,0 kg de compost maduro a las T2 y T3, con el fin de recuperar un poco de la actividad microbiana que se lavó con la lluvia.

Antes del primer volteo de todas las pilas, se agregó burucha únicamente las pilas T1 debido a que por su ubicación se vieron más afectadas por la humedad durante la primera y segunda semana. Durante cada volteo se siguieron añadiendo dos cucharadas (8 g) de MM a las pilas T1 y T3 y la cantidad de compost maduro se disminuyó a 0,5 kg en los siguientes volteos en las T2 y T3, hasta completar alrededor del 10 % del peso de la pila, siguiendo el porcentaje sugerido por Pérez, E. (comunicación personal, 06 de mayo de 2022) del proceso de compostaje de la Municipalidad de Jiménez.

Con respecto al riego, al igual que en los volteos se realizaron una vez por semana con una bomba fumigadora manual de 5 litros, con excepción de los casos en que las pilas ya se encontraran suficientemente húmedas. En el caso de la pila de control (T0) los riegos se hicieron únicamente con agua, mientras que para los demás tratamientos se hizo una mezcla de melaza y agua, siguiendo la metodología de Moreto y Delgado (2019) y Vargas (2017), en la que cada litro de melaza se disuelve en 18 litros de agua para favorecer la activación de los microorganismos y se agregan alrededor de 500 ml de la mezcla a cada pila, hasta que al realizar la prueba de puño se demostrara una humedad adecuada.

Parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso

Los parámetros que se miden en campo durante la aplicación de las tecnologías son: la temperatura, el pH y la humedad, los cuales se detallan ampliamente en la Tabla 3, junto con otros importantes de considerar, sin embargo, en este apartado se describen específicamente los que se miden cada semana, los equipos y métodos utilizados (ver Tabla 10). Los instrumentos para la medición de los parámetros fueron proporcionados por la Municipalidad de Pococí y las mediciones son de tipo cuantitativo en el caso de la temperatura y pH, y cualitativo en el caso de la humedad, debido a que no fue posible contar con un higrómetro para su medición cuantitativa.

Las variables fueron medidas durante 10 semanas, 3 días a la semana, alrededor de la misma hora, entre 8:00 am y 10:00 am de la mañana los lunes, miércoles y viernes. El registro de los valores se llevó en una bitácora en la que se anotaron tanto los datos numéricos como las

observaciones significativas presentadas durante el proceso y dicha información se acompañó de fotografías que permitieron documentar el progreso de cada uno de los sistemas.

Tabla 10

Equipos utilizados para la medición de los parámetros fisicoquímicos

Equipo	Descripción de uso	Precisión	Imagen
Termómetro	Se utiliza un termómetro Milwaukee TH310 manual. Debido al tamaño de las pilas, se coloca la punta en la parte central del sistema durante 5 min, hasta garantizar que el valor se había estabilizado, anotando posteriormente el dato en la bitácora de control. En el caso de pilas más grandes es recomendable la toma de tres o más puntos, anotando el promedio y no únicamente el valor central.	$\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
pH-metro	Se utiliza un medidor de pH portátil Milwaukee MW102. Su uso consiste en la toma de muestras de 2 g de cada pila en frascos rotulados, a estos se les agregó 2 ml de agua destilada, se revolvieron y dejaron reposar por 2 min. Transcurrido el tiempo, se introduce el sensor en el agua hasta que la pantalla indica el valor de pH. Fue necesario calibrar el equipo una vez por semana para garantizar su precisión.	$\pm 0,02$	
Báscula (g)	Se utiliza una báscula digital de marca Genérico para pesar los gramos de las muestras para la medición de pH. A pesar de que es un producto diseñado para cocina, su función fue únicamente garantizar la toma de cantidades estandarizadas que mejoraran la precisión en las mediciones de pH. Para ello, se hizo un hueco de 5 cm en la parte central de la pila y con ayuda de guantes se tomó la muestra hasta completar 2 g.	$\pm 0,1 \text{ g}$	

Para analizar las condiciones ambientales durante el proceso de compostaje, se emplearon datos en tiempo real provenientes de la Estación Automática Finca Diamantes, Guápiles, Limón, del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Se registraron los valores de temperatura ambiente al momento preciso de realizar las mediciones en las pilas, garantizando así una correlación directa entre las observaciones del compostaje y las condiciones climáticas circundantes.

La medición de la humedad se hizo únicamente de manera cualitativa mediante la “prueba del puño”, su registro se llevó igualmente en una bitácora, permitiendo conocer las necesidades de riego o aireación que requería en cada una de las pilas. Esta prueba consiste en introducir la mano en la pila para sacar un puñado de material, posteriormente presionarlo y abrir la mano y de esta manera observar la textura de la tierra y la cantidad de líquido desprendido de esta, tal como se muestra en la **Figura 16**. La prueba se realiza en la parte superior, central y en cuatro costados, para evaluar si la humedad era uniforme, o bien, si algún factor externo estuviera humedeciendo o secando particularmente alguno de los lados y poder tomar medidas al respecto.

Figura 16

Prueba de puño para conocer el contenido de humedad



Nota. Tomado de *Prueba de puño para contenido de humedad* [Fotografía], por Sierra, et al., 2020, Research Gate (https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Prueba-de-puno-para-contenido-de-humedad_fig6_349251212).

Según la FAO (2013), si la humedad es adecuada el material debe quedar compacto, pero sin escurrir agua. Si el agua escurre, es necesario realizar un volteo y añadir material secante, mientras que si el material queda suelto en la mano se debe añadir líquido y/o material fresco.

Periodo de maduración

La finalización del proceso de descomposición de los residuos orgánicos se determinó mediante la medición de temperatura, la evaluación de sus características de olor y color, y la prueba de gases. Con respecto a la temperatura, su medición y evolución durante el tiempo es un buen indicador para determinar la eficiencia y el grado de estabilidad del proceso (Fallas, 2016). Según la FAO (2013), para saber el inicio de la etapa de maduración, la temperatura debe alcanzar el valor ambiental durante tres días consecutivos y al realizar un volteo del material, no se presente un incremento. Por lo tanto, se analiza el registro de temperatura hasta notar su descenso paulatino en el tiempo, una vez que se iguale la temperatura de las pilas con la ambiental, se procede a evaluar las demás variables de olor y color.

En el caso de sus características físicas de color y olor, el material debe observarse oscuro, con olor a suelo húmedo y cuando se realiza la prueba del puño, no debe mostrar exceso de humedad (FAO, 2013). Una vez que las pilas cumplieron con estas variables, se determinó que la etapa mesofílica 2 había concluido y comenzaba la etapa de maduración. Una vez que comenzó, se tenía la intención inicial de transferir el contenido de cada pila a sacos individuales etiquetados con su respectivo código y dejarlos madurar durante un mes, pero se decidió mantener las pilas en el mismo sitio debido a que había suficiente espacio disponible y esta configuración favorecía la aireación durante el proceso. Las pilas se cubrieron con un plástico que permitía la entrada de aire y se realizó un volteo a los 15 días para asegurar una adecuada oxigenación.

Por su parte, la prueba de los gases se realizó para determinar que el tiempo de maduración fue suficiente para lograr que la estabilización de las pilas. Esto consistió en hacer un cuarteo, es decir, dividir cada pila en cuatro partes iguales, luego se tomó de cada cuarto tres muestras de 100 g, se introdujeron en bolsas plásticas herméticas durante dos días y se colocaron en un sitio fresco y seco. Si al finalizar el tiempo las bolsas se observaban hinchadas de aire y con condensación de humedad, era un indicativo de que el compost todavía se encontraba inmaduro (FAO, 2013). No obstante, como se puede observar en la **Figura 17**, al realizar la prueba las bolsas no manifestaron estas características, indicando que las muestras estaban lo suficientemente listas para el análisis. Además, se puede apreciar la textura y color oscuro similar a la tierra al finalizar este periodo.

Figura 17

Prueba de gases para determinar la finalización del periodo de maduración



Una vez determinada la finalización del periodo de maduración, se tomaron las muestras de cada tratamiento para los análisis de laboratorio, lo cual se describe en el siguiente apartado.

4.3.3.2.3 Evaluación del producto final

Resultados del laboratorio para determinar la calidad del producto final

Después de finalizar la etapa de maduración, se procedió a evaluar si alguno de los tratamientos mostraba un período de descomposición más corto. Esto se realizó mediante la medición de la temperatura y la observación del inicio y finalización del proceso. Luego, se tomó una muestra representativa de los tratamientos (T0, T1, T2 y T3), con el fin de realizar los análisis de laboratorio. Debido a restricciones presupuestarias, se analizaron dos de las tres réplicas de cada sistema: T1A y T1C, T2A y T2C, T3A y T3C y el control (T0), resultando en un total de siete muestras para ser examinadas por el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) de la Universidad Nacional sobre su pH, relación C/N, macro y micronutrientes.

Uno de los muestreadores del LAA es el encargado de la toma de las muestras y para determinar cuál de los métodos destaca como el mejor, se evaluaron los resultados de pH, humedad, relación C/N, contenido nutricional y metales pesados. Cada tratamiento es comparado con el control y valorado, de ser posible, en conformidad con las directrices de la Norma chilena NCh2880 para compost de Clase A y B, debido a que actualmente en Costa Rica no existe una regulación específica (Pérez, 2018., y Sánchez y Domínguez, 2020). A su vez, se comparan con otras fuentes de información y los resultados se presentan a través de tablas y gráficas de líneas y barras realizados en Microsoft Excel.

Los resultados se presentan en cuatro tablas: la primera aborda parámetros fisicoquímicos como pH, porcentaje de humedad y relación C/N; la segunda detalla la concentración de macronutrientes primarios como nitrógeno total (NT), fósforo (P) y potasio (K). La tercera presenta los macronutrientes secundarios como calcio (Ca) y magnesio (Mg), y micronutrientes como hierro (Fe) y manganeso (Mn). Finalmente, la cuarta aborda los resultados de Cromo (Cr) y Zinc (Zn), considerados metales pesados en la NCH2880, comparando con los límites establecidos en esta norma. Una vez presentados y analizados los datos, se formuló la propuesta con el método que arrojó las mejores propiedades y equilibrio general de nutrientes.

Determinación de la viabilidad de implementación

La evaluación de la viabilidad de implementación se llevó a cabo mediante un análisis de los costos asociados con la implementación y operación del compostaje centralizado utilizando el método que demostrara mejores resultados. En primer lugar, se calcularon los costos de implementación, los cuales incluyeron la adquisición de equipos, materiales e insumos necesarios. Los costos operativos, por otro lado, abarcaron aspectos como la recolección de residuos, el recurso humano y el consumo de combustible para el funcionamiento diario del proyecto.

Para determinar la rentabilidad, estos costos se compararon con los ingresos proyectados derivados de la venta del compost final y con el ahorro por no enviar los RO al relleno sanitario. De esta manera, la información obtenida proporciona una visión general de la viabilidad financiera y contribuye a la toma de decisiones informada sobre la implementación del proyecto en el distrito. A su vez, para complementar el factor económico se considera el componente social, utilizando como base las encuestas realizadas durante la primera fase del estudio.

4.3.4 Fase 3. Propuesta para la gestión de los residuos orgánicos

Elección del método de compostaje

Esta fase del proceso articula diferentes variables con el propósito de desarrollar una propuesta integral que facilite su implementación. Inicialmente, con base en los resultados obtenidos en la fase 2, se establece la elección del método que mejor se adapta a las necesidades de este municipio, tanto por el grado de éxito del producto final, como por la eficiencia del proceso. Las variables por considerar se determinaron a través de los análisis de laboratorio de cada uno de los tratamientos y mediante la valoración de los costos para el desarrollo de cada uno, así como su viabilidad de implementación. A su vez, los parámetros fisicoquímicos de control durante el proceso ayudan a conocer cuál presenta mejores resultados asociados a los rangos ideales, a lo

largo de las diferentes etapas del proceso, lo cual permite hacer una correlación de las variables y su influencia sobre el éxito de los sistemas.

Contenido de la propuesta

La recomendación del sistema a implementar incorpora la descripción de cada una de las fases y consideraciones para su desarrollo durante la etapa de operación, detalla los insumos necesarios, tanto sobre materiales, como sobre los recursos humanos y económicos asociados. Todos estos detalles asociados al tipo de compostaje elegido se describieron en el documento, que funciona como una guía para la municipalidad en el momento de su planeación y ejecución. Además, la propuesta se aborda desde el enfoque de economía circular, para lo cual, se considera en la propuesta desde la etapa de recolección hasta el empaquetado y venta del producto final, con el fin de identificar puntos críticos del proceso que ayudan a desarrollar un proceso responsable y cíclico, incidiendo sobre la sostenibilidad de este.

Seguidamente, se incluye un apartado en el que se especifican los aspectos relevantes a considerar sobre el diseño de las instalaciones que servirán como espacio destinado para el tratamiento durante la fase de operación. Estos criterios pretenden incluir los detalles más significativos respecto a la infraestructura, como el área necesaria según el volumen de residuos orgánicos generados, los espacios que se necesitan para lograr un adecuado almacenamiento del material tras finalizar el proceso de compostaje o sobre la recolección de los lixiviados.

Finalmente, la propuesta concluye con un apartado de recomendaciones generales en las que se abarcan cuestiones vinculadas de manera indirecta al proceso de compostaje, pero que influyen significativamente sobre el éxito del proyecto. En esta sección se plantean asuntos como análisis legal, aspectos técnicos y de diseño, usos del compost, la recolección y el transporte de los residuos y la consideración de los actores involucrados, así como las necesidades de capacitación y talleres. A modo de resumen, la propuesta considera los siguientes apartados:

- 1) Primer apartado: Preparación y planificación.
 - Disponibilidad del residuo orgánico.
 - Análisis legal.
- 2) Segundo apartado: Diseño de planta.
- 3) Tercer apartado: Aspectos técnicos de operación.
 - Descripción del sistema.
 - Recolección de residuos.

- Equipamiento.
- Procedimientos.
- Parámetros de control durante el proceso.
- Recurso humano.

4) Cuarto apartado: Gestión y administración.

- Calidad y características fisicoquímicas del producto final.
- Consideraciones sobre el enfoque de economía circular.
- Recomendaciones de uso y comercialización.

V. Resultados y discusión

5.1 Manejo y generación de los residuos orgánicos de viviendas y comercios

Los resultados desarrollan la información derivada de las encuestas aplicadas a los sectores residencial y comercial del distrito de Guápiles y expone los valores en kilogramos obtenidos del pesaje de las muestras del estudio de generación ejecutado en ambos sectores.

5.1.1 Encuestas realizadas al sector residencial

Las encuestas se aplicaron a un total de 268 personas en un rango de edades desde los 13 a los 86 años, con una población total de 859 habitantes y un promedio de 3,21 personas por vivienda. Como parte de las primeras preguntas realizadas se consultó sobre la calidad del servicio que ofrece la municipalidad, resultando con una percepción positiva por parte de la población. Las calificaciones de bueno y excelente ocupan las primeras posiciones con 49 % y 31 %, respectivamente, mientras que la valoración de deficiente obtuvo el último lugar con un 3 %.

En el más reciente Índice de Gestión Municipal emitido por la Contraloría General de la República en el 2018, se evaluaron a los 81 gobiernos locales en cuatro grupos, acorde a su presupuesto, Índice de Desarrollo Humano cantonal (IDHc) y cantidad de kilómetros cuadrados de territorio, siendo el grupo A el mejor posicionado en estos indicadores y el D, el peor. La Municipalidad de Pococí fue categorizada en el grupo B, en el cual, de los 5 ejes evaluados el tercero, la Gestión de Desarrollo Ambiental, fue el que obtuvo la calificación más baja. Asimismo, del total de 14 indicadores el único que obtuvo un retroceso del 2017 al 2018 fue el de la recolección de residuos (Contraloría General de la República [CGR], 2019).

El nivel de satisfacción de la población se evaluó a través de la puntuación de una serie de indicadores de 0 a 100. Si se comparan los datos obtenidos específicamente en la Municipalidad

de Pococí respecto a los promedios de los cuatro grupos en que se categorizan todos los gobiernos locales, el eje de Gestión de Desarrollo Ambiental es el más bajo para ambos casos. Además, en lo que concierne al indicador de “recolección de residuos” evaluado dentro de dicho eje, el promedio general de los grupos fue de 56,91, mientras que el de este territorio de 44,05, siendo una de las principales oportunidades de mejora destacadas en el informe tanto a nivel nacional como en el caso específico de Pococí (CGR, 2019).

La mayoría de las municipalidades destinan menos del 10 % de los ingresos de la tasa para el desarrollo de servicios públicos en la categoría ambiental. Esta debilidad en la sostenibilidad financiera hacia la prestación de servicios ambientales es la principal causa de la baja calificación en esta área según la Contraloría General de la República (CGR, 2019). Sin embargo, es importante destacar que los resultados del Índice de Gestión Municipal pueden no coincidir con los de las encuestas aplicadas. Esto se debe a que las encuestas se realizaron únicamente en los sitios donde se brinda el servicio de recolección de residuos y de materiales valorizables del distrito de Guápiles, lo que puede no ser representativo de todo el cantón de Pococí. Es posible que en otros sectores donde estos servicios no están disponibles, las calificaciones sean más bajas, lo que podría coincidir con los datos proporcionados por la CGR.

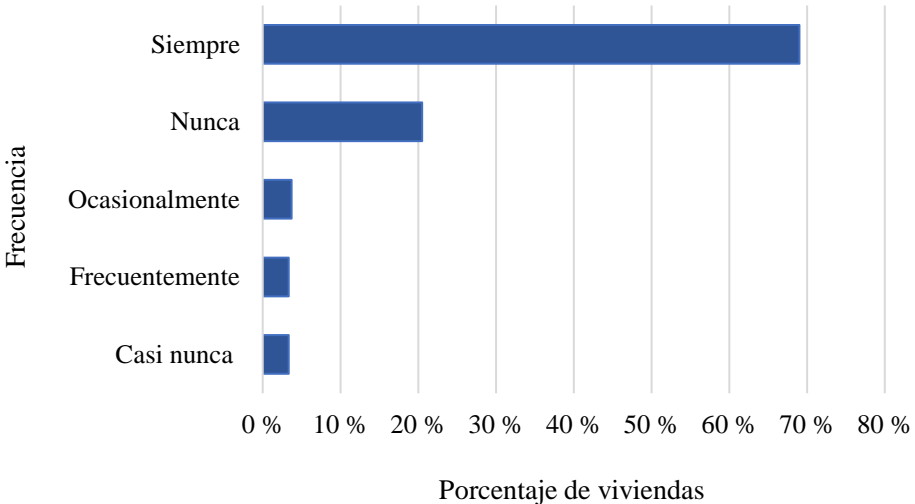
Cabe destacar, que la frecuencia de recolección es una vez por semana en los barrios céntricos, sitios en los que se realizaron la mayoría de las encuestas, pero en el sector central del distrito de Guápiles se brinda un servicio más especializado de lunes a sábado, al ser la zona comercial más importante del cantón, y dos veces por semana en el centro del distrito de Cariari (Comisión GIR Pococí, 2017). Este factor fue el más criticado por la población al calificar el servicio, ya que diversas familias manifestaron que es insuficiente la recolección una vez a la semana, sugiriendo una recolección de al menos dos veces semanales.

Dentro de los servicios que ofrece la municipalidad, se brinda el de recolección selectiva en la ruta semanal o quincenal donde se llevaron a cabo las encuestas. En relación con esto, casi el 70 % de la población del estudio afirmó separar los residuos valorizables siempre (Figura 18), lo cual demuestra una conciencia ambiental de los ciudadanos y se vincula con la adecuada gestión municipal en esta materia. A pesar de esto, todavía existe una proporción significativa del 21 % que declaró no separar nunca o no hacerlo de manera regular como un hábito en su familia, esto a causa de múltiples factores dentro de los que se encuentra la disconformidad con el servicio debido a inconsistencias, desconocimiento del horario o de la adecuada separación, falta de paciencia, tiempo o espacio para realizar la limpieza y clasificación.

Las causas mencionadas de la no separación se mantienen a través de los años, ya que un estudio sobre la misma población en 2018 determinó que las justificaciones para la falta de hábitos de reciclaje fueron prácticamente la mismas (Solís y Abarca, 2021). Según Rodríguez (2020), para mejorar las prácticas de separación es fundamental no solo abrir el espacio para foros de diálogo, sino también impulsar la educación ambiental comunitaria. El principal problema del manejo de residuos son los hábitos de consumo y desperdicio, por lo que, también para Soto (2019), resulta necesario aplicar políticas adecuadas de educación que incentiven el conocimiento y uso correcto de la jerarquización de los residuos. Esto puede ser un aspecto positivo sobre la participación de la población si se establece un proyecto para la recolección de residuos orgánicos, ya que hay una anuencia y una práctica de separación en el mayor porcentaje de la población.

Figura 18

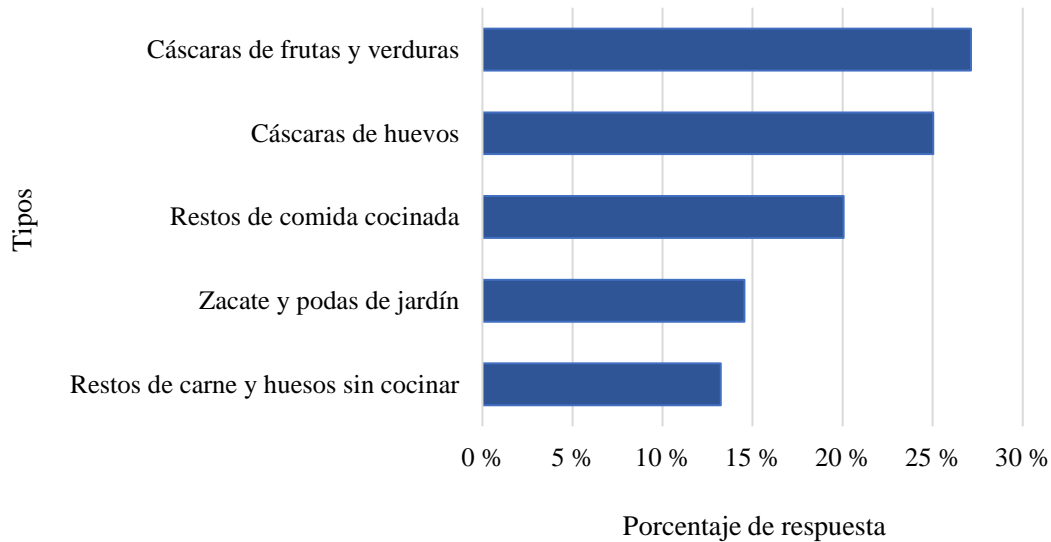
Porcentaje de viviendas y frecuencia con la que separan los residuos valorizables



Con respecto a los residuos orgánicos, específicamente, de acuerdo con la percepción de las personas encuestadas, los tipos generados en mayor cantidad en las viviendas son las cáscaras de frutas y verduras, cáscaras de huevos y restos de comida cocinada (Figura 19). El patrón de generación de residuos está influenciado por los hábitos de consumo de las familias y su nivel socioeconómico. Los residuos de jardín, por ejemplo, son un tipo voluminoso que se genera en grandes cantidades en algunos sectores, no obstante, no todas las familias cuentan con los recursos económicos para disponer de amplios jardines que aumenten la generación de este tipo de residuos, especialmente en los barrios cercanos al centro donde existen menos áreas verdes.

Figura 19

Tipos de residuos orgánicos generados en mayor cantidad según percepción



La comparación entre distintos centros de compostaje a nivel nacional resalta similitudes y diferencias en la recepción de residuos. En términos generales, existe una tendencia común de aceptar cáscaras de huevo, bosorola de café, servilletas, residuos de jardín, frutas y vegetales, en la mayoría de los centros como el de Jiménez, San Rafael, Alvarado, Pérez Zeledón y San Isidro. Mientras que se observa una exclusión general de residuos cárnicos en Jiménez, San Rafael, Alvarado y San Isidro que sugiere una preocupación compartida sobre la lenta descomposición de estos y los retos asociados. Algunos sitios como Alvarado, Pérez Zeledón y San Isidro prefieren evitar alimentos cocinados o limitar su aceptación a pequeñas cantidades, debido a una preferencia por materias primas más simples y controladas. Además, existe una variabilidad en la aceptación de lácteos sólidos y la mayoría rechaza grasas, excretas de mascotas y líquidos como caldos y sopas, resaltando diversidad en las políticas de manejo de estos productos, influida por los intereses específicos de cada planta de compostaje y sus procesos operativos (comunicación personal, 28 de febrero de 2022).

Los resultados son de suma importancia para comprender el patrón de generación de RO en el distrito de Guápiles. Sin embargo, existe una escasez significativa de información a nivel nacional para realizar comparaciones adecuadas. El I Plan Nacional de Compostaje 2020-2025 destaca la necesidad de establecer sistemas de recopilación y monitoreo de datos para abordar esta falta de claridad en cuanto a los principales tipos de materia orgánica o biodegradable que están siendo enviados a los rellenos sanitarios (Consejo Nacional Ambiental, 2020).

Se ha podido observar que el sistema de información sobre residuos en el país presenta una seria limitación. Las publicaciones actuales están sujetas a un sesgo considerable, influenciado por diversos factores como el investigador, las fechas, las metodologías y consideraciones económicas o políticas. Por lo cual, según Soto (2019), sin una plataforma integral respaldada por el Ministerio de Salud que reúna métricas y datos anuales, resulta imposible obtener un conocimiento preciso sobre la disposición de materiales en el país.

La carencia de información sobre el tema de residuos en el país es general, pero es todavía más notorio sobre los de tipo orgánico, donde la mayoría de los gobiernos locales ni siquiera los recolecta de forma separada o estudia los hábitos de generación y disposición de la población sobre estos en particular. Según un estudio realizado por Rodríguez (2020), los residuos orgánicos son uno de los que menos se recolecta por las municipalidades debido a que se considera dentro de los materiales de difícil reciclaje o con una logística de transporte más complicada. Únicamente las municipalidades de Alvarado, Jiménez, San Rafael de Heredia, Pérez Zeledón y Tilarán poseen proyectos de recolección y tratamiento de residuos orgánico (Rudín et al., 2019).

Ante la falta de información que existe en el país sobre estos residuos, en el 2022 se entrevistó de manera virtual a las personas del departamento ambiental de las municipalidades mencionadas, con el fin de conocer más sobre los proyectos. Respecto al principal método de disposición de RO previo a la recolección diferenciada para elaboración de compostaje, todas expresan que la población los disponía principalmente en el camión municipal y eran llevados a un relleno sanitario, con excepción del gobierno local de Tilarán que establece una diferencia para la zona rural y urbana, donde en la urbana se mantenía esta tendencia, pero en la rural las personas usaban el entierro, el vertimiento directo en plantas y árboles o la alimentación de animales (Campos, M, comunicación personal, 28 de febrero de 2022).

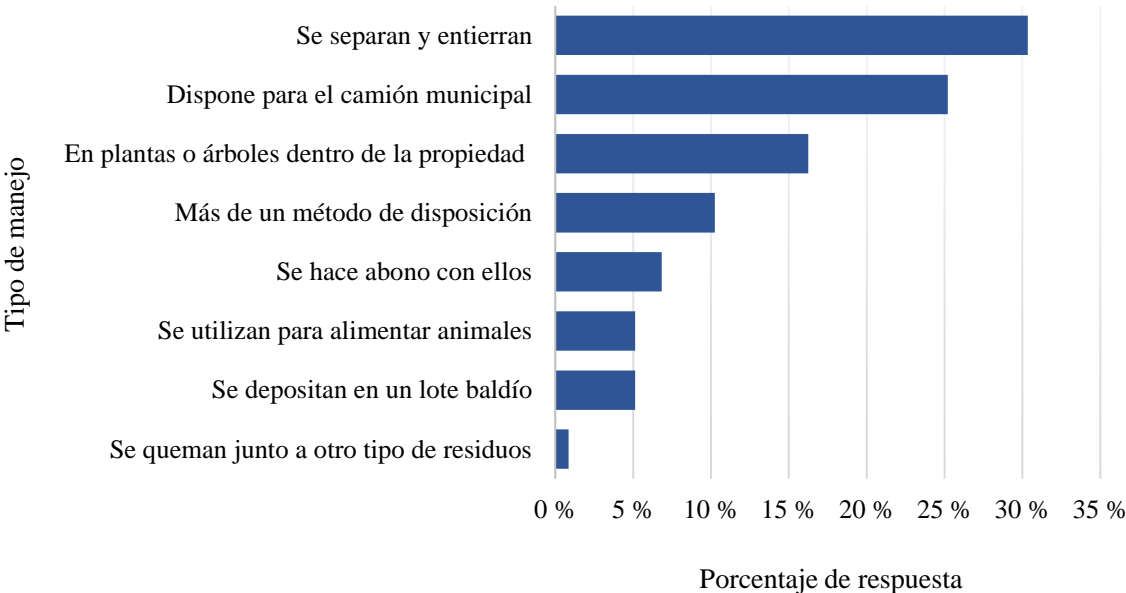
En el caso de este estudio se puede observar que el entierro es el método de disposición más común, seguido por el uso del camión de recolección de residuos ordinarios y, en tercer lugar, la colocación en raíces de plantas o árboles, ilustrado en la **Figura 20**. La información obtenida se asemeja con lo expresado por Campos, M (comunicación personal, 28 de febrero de 2022) de la municipalidad de Tilarán, pero también hay un alto uso del camión municipal, ya que la zona de estudio se considera urbana y rural (INDER, 2015). De manera similar, una encuesta llevada a cabo en el cantón de Turrialba sobre la disposición de residuos orgánicos en su población reveló hábitos muy parecidos a los de la zona de estudio. Así como en Guápiles, solo el 25 % de los encuestados los entregan al camión municipal, ya que las personas optan por métodos alternativos

como la elaboración de compost, la alimentación de animales, el entierro o el uso en el jardín (Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente [ACEPESA], 2021).

Es importante resaltar, que las personas encuestadas expresaron su preferencia por métodos alternativos debido a los inconvenientes de almacenar residuos orgánicos, especialmente cuando la frecuencia de recolección es considerada baja. Comparado con Turrialba y Liberia, donde al igual que en Guápiles hay zonas rurales, y contrastando con Jiménez, Alvarado o San Rafael de Heredia, mayormente urbanas, se observa una tendencia a optar por alternativas cuando es posible. Estos métodos, se eligen más cuando hay áreas verdes adecuadas; sin embargo, a menudo no hay alternativas, lo que lleva a desechar estos residuos junto a los inorgánicos, causando malos olores, moscas, lixiviados e incrementando emisiones debido a la gestión inadecuada.

Figura 20

Manejo de residuos orgánicos en viviendas



Aunque, el porcentaje de residuos que se dispone en el camión municipal es menor al esperado, sigue siendo preocupante. Esto se debe a que el 98 % de las emisiones de GEI del sector de residuos sólidos proviene principalmente de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos en vertederos y rellenos sanitarios. La compactación y apilamiento de estos produce un entorno sin oxígeno, lo que resulta en la liberación de grandes cantidades de metano (CH₄), el cual posee un Potencial de Calentamiento Global (PCG), 21 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO₂), mientras que, si se gestionaran a través de compostaje que es un proceso aeróbico, la cantidad de emisiones de CO₂-eq se reduciría en aproximadamente 7 veces (Fernández, 2020).

Un aspecto positivo para tomar en cuenta es que gran parte de la población encuestada mencionó que realiza una separación previa de este tipo de residuos para evitar los problemas mencionados, incluso cuando se dispone en el camión municipal. Esta práctica podría facilitar la implementación de proyectos centrados en la economía circular, dado que ya existe una costumbre arraigada en la población sobre la separación. Esto se refleja en las respuestas obtenidas sobre la disposición a participar en el proyecto en caso de implementarse, ya que el 85 % indicó estar dispuesto, mientras que del 15 % restante que dijo que no, un 29 % justificó su negativa argumentando que necesitaba estos residuos para la generación de abono o la alimentación animal.

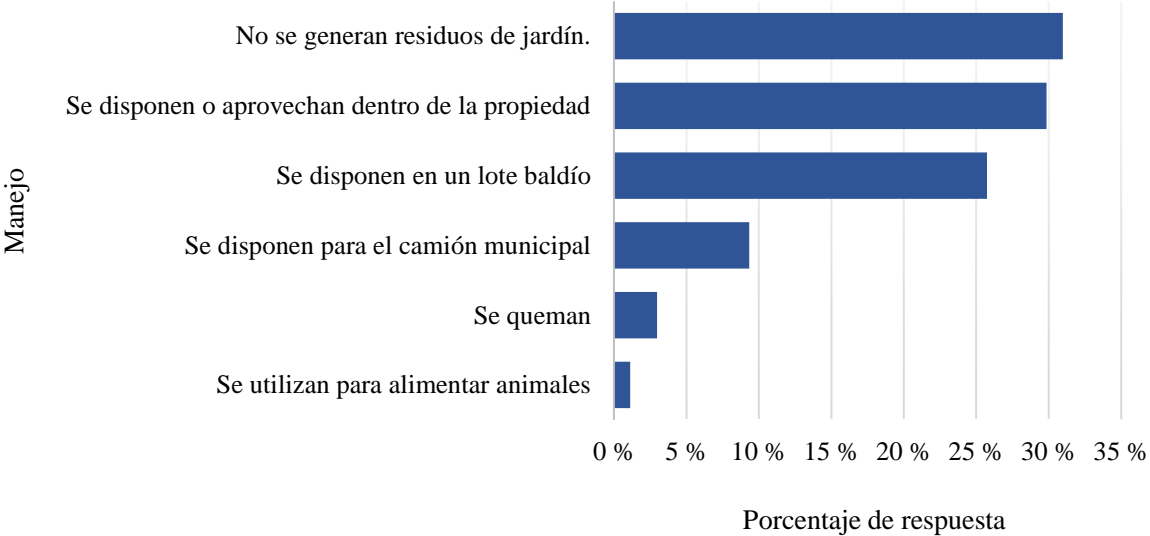
De las cinco municipalidades con proyectos de recolección y tratamiento de RO mediante sistemas de compostaje, Alvarado y Jiménez se destacan por las grandes cantidades que manejan: 50 y 43 ton mensuales, respectivamente. Al consultarles sobre los principales desafíos de implementación, la Municipalidad de Jiménez señaló que, al inicio de la recolección diferenciada, uno de los mayores retos fue la resistencia de la población en la correcta separación (Pérez, E, comunicación personal, 06 de mayo de 2022). La Municipalidad de Alvarado reafirma dicha experiencia, subrayando que la concientización y participación de la comunidad fue el mayor reto (Chacón, R, comunicación personal, 28 de febrero de 2022). Estas experiencias reflejan lo útil de que la población de estudio tenga hábitos de separación de residuos orgánicos.

En lo que respecta específicamente a los residuos de jardín, como podas y zacate (ver Figura 21), la disposición en el camión municipal solo representa el 9 %. Esto se debe a que, durante el desarrollo de las encuestas, la municipalidad no brindaba este servicio de recolección y la población lo tenía claro, expresando que incluso el personal revisaba las bolsas para evitar llevarse este tipo de material. Por lo tanto, solo una pequeña proporción se arriesga a enviarlos en el camión, a veces triturándolos y mezclándolos con los residuos inorgánicos para evitar su identificación.

A pesar de que el mayor porcentaje está ocupado por las viviendas que no generan residuos de jardín con un 31 %, del 69 % restante que sí los produce, gran cantidad de personas expresaron su necesidad e interés en que la municipalidad recoja este tipo de residuos. En algunas ocasiones, hubo descontento debido a la falta de este servicio, especialmente cuando no hay terrenos baldíos cercanos, debido al gran volumen que ocupan y el tiempo de degradación prolongado. Este factor podría influir en la percepción de la población sobre la calidad del servicio, no obstante, también es necesario considerar que, si se recogen para ser enviados al relleno sanitario pueden aumentar el impacto ambiental por las emisiones de GEI, así que el Programa País de Carbono Neutralidad

incentiva la recolección de este tipo de residuos, pero ofrece alternativas de tratamiento como vermicompostaje, lombricompostaje o mediante pilas, las cuales son útiles para su aplicación a gran escala como la que se requiere en términos cantonales (Vega y Gutiérrez, 2021).

Figura 21
Manejo de residuos de jardín en viviendas



Aunque, no se cuenta con información a nivel nacional sobre cuántas de las 82 municipalidades ofrecen este servicio, a través de las entrevistas se obtuvo información sobre las prácticas de las únicas cinco que realizan recolección diferenciada de residuos orgánicos. Estas municipalidades también aceptan residuos de jardines, aunque la frecuencia y modalidades varían. En Jiménez, estos se recogen junto con otros residuos orgánicos de una a tres veces por semana, según la zona. Alvarado y San Rafael de Heredia, realizan la recolección una vez por semana. Tilarán lleva a cabo la recolección de manera separada en una ruta especial, pero con menor frecuencia. En Pérez Zeledón, si los residuos no exceden el tamaño de una bolsa de basura mediana, se recolectan dos veces por semana junto con los demás residuos orgánicos; de lo contrario, las personas deben llevarlos. Todas estas incorporan estos residuos en sus procesos de compostaje municipal.

Finalmente, se consulta a los encuestados acerca de su experiencia en capacitaciones sobre el aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de abono. En este sentido, el 81 % respondió que nunca había recibido capacitación específica en este tema, aparte de la información que habían obtenido a través de la televisión o internet. Al indagar sobre el interés en aprender a

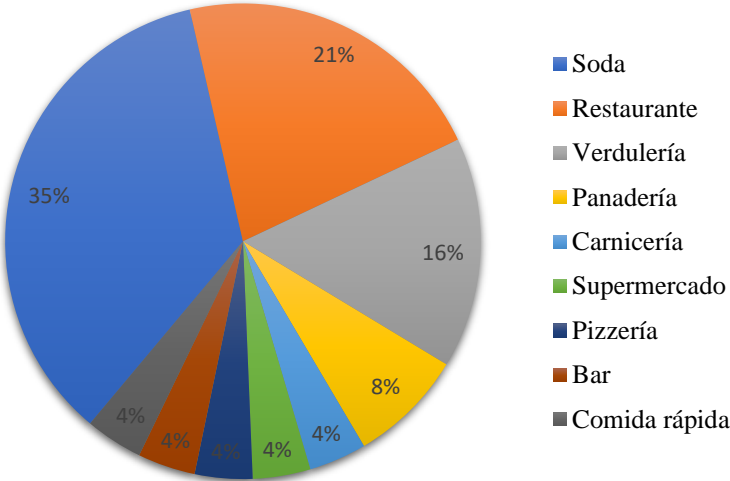
cerca de este tema, un 85 % manifestó estar interesado. Este nivel de interés proporciona un incentivo para la planificación de charlas, talleres y capacitaciones por parte de la municipalidad.

5.1.2 Encuestas realizadas al sector comercial

Las encuestas se realizan a un total de 51 comercios conformados por sodas, panaderías, carnicerías, bares, restaurantes, supermercados, verdulerías y pizzerías. La distribución porcentual de la cantidad de comercios según el tipo se encuentra en la **Figura 22**, en la que se puede observar que los principales tipos de comercios que participaron en el estudio son sodas, restaurantes y verdulerías, consecutivamente. Al ser un muestreo aleatorio, también refleja la distribución de los principales comercios generadores de residuos orgánicos por tipo en el distrito de Guápiles.

Figura 22

Distribución porcentual de los tipos de comercios encuestados



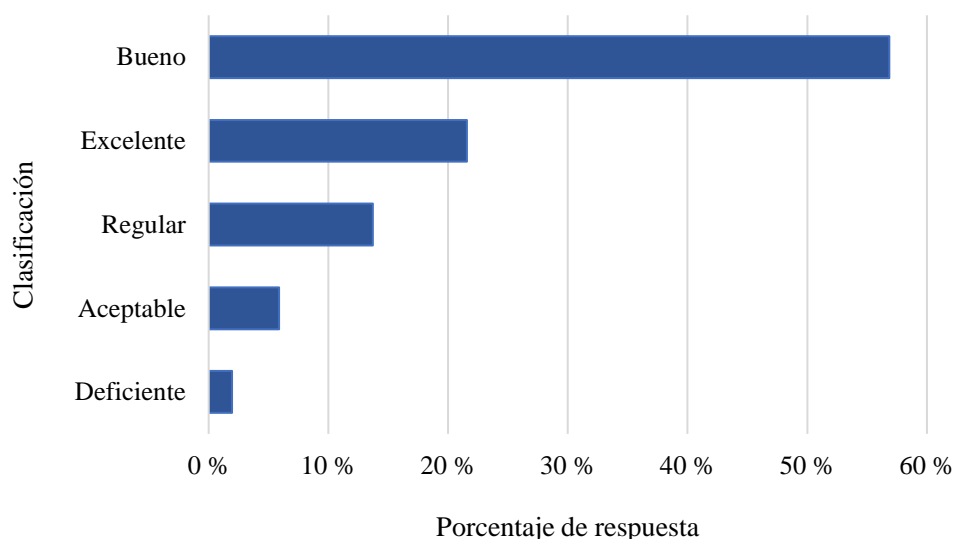
El 75 % de los comercios encuestados se clasifican dentro de la categoría de microempresas y el 25 % restante como pequeñas empresas, según la clasificación de la Caja Costarricense del Seguro Social [C.C.S.S], citada en el Estado de Situación PYME en Costa Rica por Arce (2021), la cual aclara que una microempresa posee de 1-5 trabajadores, pequeña de 6-30, mediana de 31-100 y grande >100. A su vez, indica que el promedio en la distribución de empresas del 2015 al 2019 fue de 80,94 % microempresas, 12,5 % pequeñas empresas, 4,1 % medianas y 2,5 % grandes, demostrando que los porcentajes obtenidos son un gran acercamiento a la realidad nacional.

En cuanto a la percepción del sector comercial sobre la calidad del servicio que ofrece la municipalidad, mostrado en la **Figura 23**, se pudo conocer que existe una percepción positiva, debido a que las calificaciones de bueno y excelente ocupan las primeras posiciones con un 57 %

y 22 %, consecutivamente, mientras que la clasificación de deficiente se encuentra en la última posición con un 2 %. Cabe destacar que la distribución de las clasificaciones de percepción entre viviendas y comercios sigue la misma tendencia, únicamente con variaciones en los porcentajes.

Figura 23

Percepción del sector comercial de la calidad del servicio de recolección de la municipalidad



Se puede observar un notable grado de satisfacción en el sector comercial, ya que cerca del 80 % de las respuestas calificaron el servicio como bueno o excelente. Esta evaluación favorable por parte de los usuarios se atribuye principalmente a la frecuencia y puntualidad de la recolección, según manifestaron las personas encuestadas, debido a que la mayoría de los establecimientos se encuentran dentro de la ruta de recolección diaria, lo que significa que el camión municipal recoge los residuos en un horario establecido de lunes a sábado. Sin embargo, algunos comercios expresaron descontento sobre el servicio de recolección de los residuos valorizables, que según usuarios presenta inconsistencias, lo cual afecta la calificación en determinados casos.

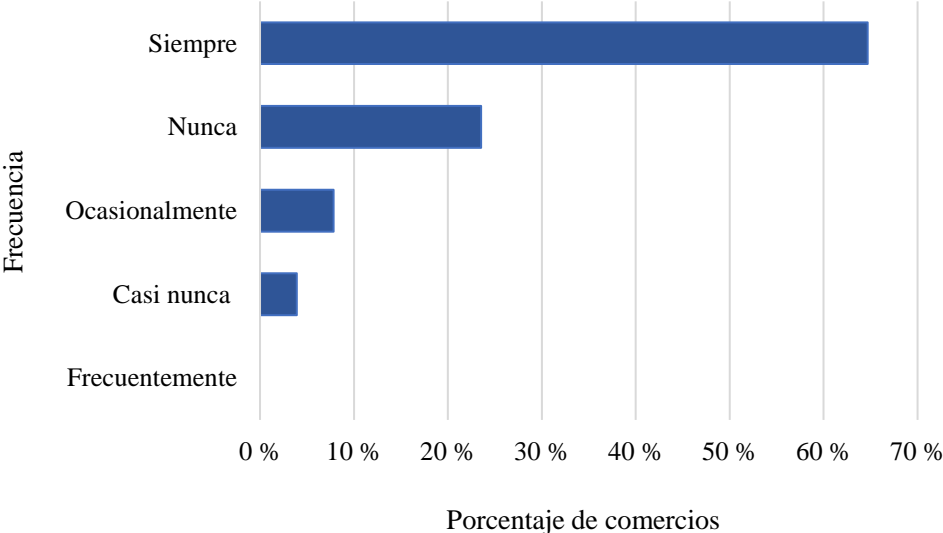
La consistencia en la frecuencia de recolección de residuos es esencial para prevenir prácticas ambientalmente perjudiciales, como la quema o la disposición inadecuada. Siguiendo las directrices de la ENSRVR, que establece recomendaciones sobre las frecuencias para diversos tipos de residuos, se puede mejorar no solo la gestión, sino también la satisfacción y el compromiso de los usuarios (Ministerio de Salud, 2016b). Por tanto, se considera que mantener una recolección uniforme es una medida efectiva para promover prácticas de disposición responsables.

Los resultados sobre la utilización del servicio de recolección de residuos valorizables mostraron que la mayoría lo emplea. Esto es evidente al observar la **Figura 24**, donde el 65 % de

los comercios afirmó que realiza diariamente la separación de residuos valorizables, lo que refleja un alto nivel de conciencia y responsabilidad ambiental, que además está estrechamente vinculado con la gestión municipal efectiva en este ámbito. No obstante, sigue existiendo una proporción significativa del 24 % que manifiesta no separarlos nunca, esto a causa de múltiples factores como el desconocimiento del horario, espacios limitados para el almacenamiento o falta de tiempo y/o interés para realizar la limpieza y clasificación necesaria.

Figura 24

Frecuencia de separación de los residuos valorizables en el sector comercial



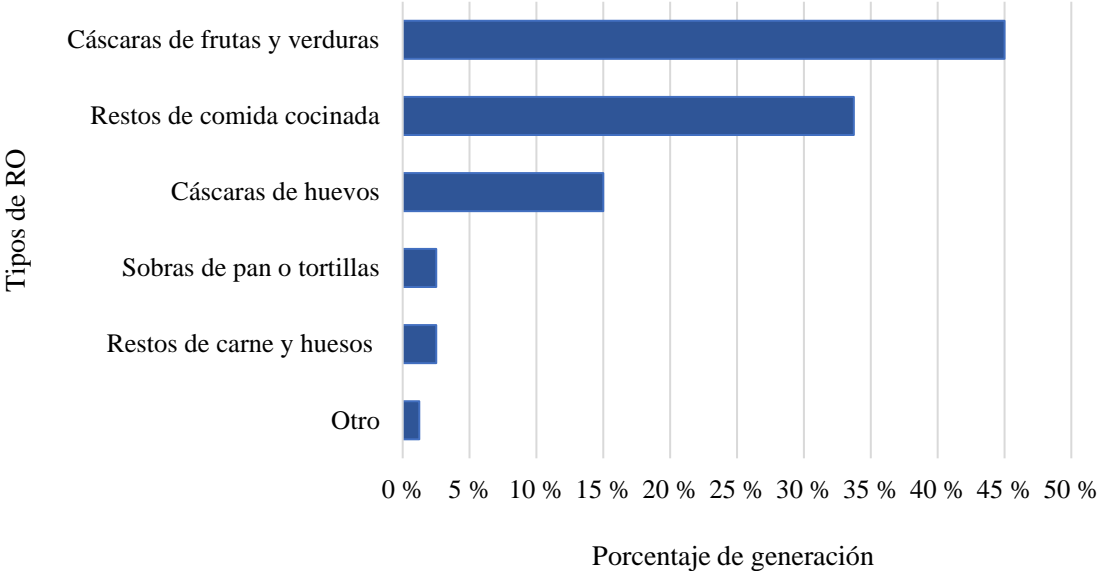
Los resultados obtenidos difieren con los del estudio de Solís y Abarca (2021), realizado en el 2018 en el mismo sector comercial del distrito de Guápiles, en el que los porcentajes fueron de un 49 % los que sí separan los residuos y de un 39 % los que nunca lo hace. A través de la comparación de los datos se puede observar un aumento en el porcentaje de comercios que afirman separar siempre en un 16 %, esto en un periodo de cuatro años, lo que puede indicar un aumento en la conciencia y educación ambiental de la zona de estudio.

En cuanto a los RO, se identificó que los comercios generan predominantemente cáscaras de frutas y verduras, seguido por restos de comida cocinada y cáscaras de huevos, como se detalla en la **Figura 25**. Es relevante tener en cuenta la conexión que existe entre estos residuos y los tipos de comercios, cuya distribución se muestra en la **Figura 22**. Al comparar los principales comercios participantes con los tipos de RO más generados se evidencia una fuerte correlación. De igual forma, se detecta una menor presencia de comercios como carnicerías, que producen restos de

carnes y huesos, o pizzerías y panaderías, que generan sobras de pan, harina o cáscaras de huevos, siendo estos también los residuos menos comunes.

Figura 25

Tipos de residuos orgánicos generados en mayor cantidad en comercios



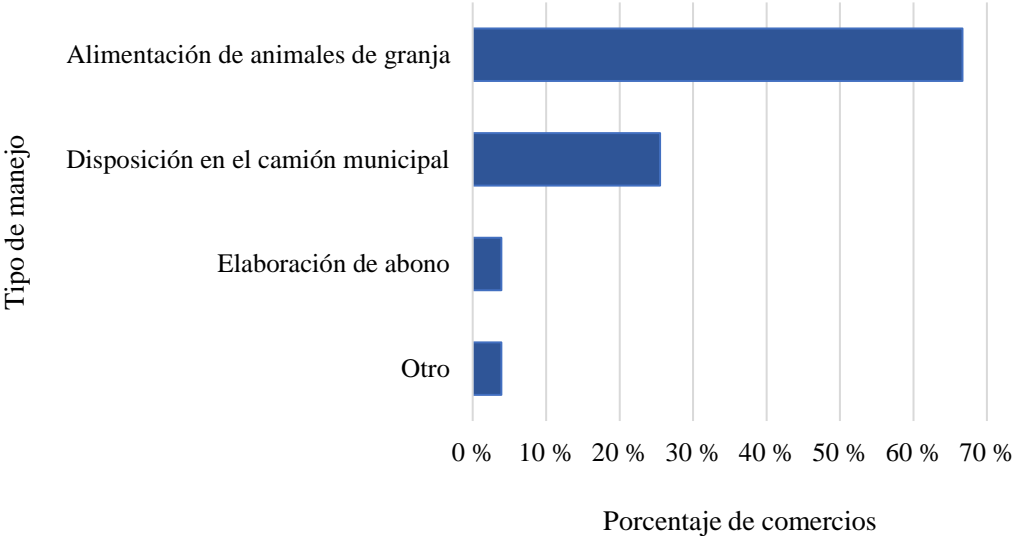
Uno de los resultados más importantes, obtenidos sobre este sector, es respecto al método empleado para el manejo de los residuos orgánicos (ver Figura 26). Se obtuvo que el 75 % de comercios ya separa estos residuos y les brinda una disposición diferente de la recolección convencional realizada por el camión municipal para su depósito en el relleno sanitario, siendo solo el 25 % los que optan por disponerlos de esta manera. La estrategia más común utilizada es la separación de los residuos con fines de alimentación animal, especialmente cerdos y vacas, a través de acuerdos colaborativos entre productores locales y los comercios. Esta práctica se justifica por la gran presencia de la industria agrícola y ganadera en Pococí, como respalda el Plan Estratégico para el Desarrollo Cantonal 2011-2017, el cual expone que el 45 % de la población económicamente activa trabaja en este sector (Comisión GIR Pococí, 2017).

A pesar de que solo el 4 % de los comercios produce abono mediante prácticas de compostaje, resulta interesante el principal método de gestión actual que ha sido impulsado por las mismas partes involucradas. Esta estrategia se origina en la necesidad de una eliminación eficiente de los residuos, junto con la demanda de insumos para alimentación animal. Estos factores han generado una simbiosis en la que los residuos de un sector se convierten en la materia prima de otro, presentando un claro ejemplo de un enfoque de economía circular que abarca ya al

75 % de los comercios. Es importante señalar que algunos establecimientos que disponen sus residuos a través del camión municipal reportaron que anteriormente siguieron el mismo método de asociación con productores. No obstante, estos últimos dejaron de requerir los RO, obligándolos a disponer en el camión hasta que les fuera posible contactar con otro productor.

Figura 26

Manejo de residuos orgánicos en comercios



La dinámica entre comercios y productores para la recolección consiste en que el establecimiento almacena los RO en contenedores separados que son recogidos por el productor diariamente o de dos a tres veces por semana, dependiendo de la cantidad. Algunos de los recolectores poseen horarios fijos, mientras que en otros casos el comercio notifica cuando el recipiente está lleno para su retiro. En el caso de los residuos de frutas y verduras, suelen destinarse como alimento para el ganado vacuno, mientras que los alimentos cocinados se dirigen principalmente a porquerizas. Este enfoque no solo contribuye a la minimización de residuos, sino que también establece una sinergia valiosa entre los sectores económicos locales y la gestión ambiental responsable.

La carencia de datos específicos sobre la generación y disposición de RO en el país, respaldada por el *Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2019*, que subraya las serias limitaciones del sistema de información sobre residuos sólidos a nivel nacional (Soto, 2019), dificulta la comparación entre las prácticas utilizadas en otras regiones. No obstante, las entrevistas realizadas en 2022 a las municipalidades de Alvarado, Jiménez, San Rafael de Heredia, Tilarán y Pérez Zeledón, revelan que antes de la implementación de la recolección

selectiva de RO, la disposición principal era el relleno sanitario, lo cual impulsó sus proyectos de tratamiento mediante compostaje centralizado. Esto pone de manifiesto tanto la necesidad de investigaciones más profundas sobre este tema, como la singularidad de la zona de estudio, donde se opta por un método alternativo a la recolección municipal junto a los residuos ordinarios.

Por su parte, la gestión de residuos de jardín en este sector carece de relevancia, ya que el 98 % de los comercios no genera residuos de este tipo, en parte debido a la predominante naturaleza urbana y la limitación de espacios verdes de esta zona comercial. En cuanto a la capacitación en el tema de gestión de residuos orgánicos mediante compostaje para generar abono, en los comercios es inexistente, ya que el 100 % afirmó no haber recibido información en este ámbito. Dado el fuerte componente agrícola y ganadero en la zona, se podría considerar impulsar estrategias de formación para promover prácticas sostenibles y un aprovechamiento más integral de los residuos orgánicos.

Finalmente, al cuestionar sobre el interés en la implementación del proyecto y en la separación de los residuos para su entrega a la municipalidad con el propósito de producir de abono, el mayor porcentaje del 61 % manifestó estar interesado en esta posibilidad. No obstante, existe una proporción significativa del 23 % que mostró ciertas dudas respecto a la utilización futura de dicho servicio en caso de su implementación, mientras que un 16 % de antemano expresó un desinterés inicial.

Las principales razones que subyacen en estas dudas o falta de interés están íntimamente ligadas a que los comercios ya cuentan con alianzas establecidas y un vínculo con los productores locales que retiran sus residuos. Es esta conexión la que llevó a muchos a expresar su preferencia por mantener el sistema actual, mientras que otros requieren sus residuos para usos específicos, tal y como sucedió también con algunas viviendas. Cabe señalar que algunas personas que respaldan el desarrollo del proyecto manifiestan su interés en que el servicio estuviera disponible en caso de que ocurriera algún contratiempo con el sistema actual. No obstante, no se comprometen a ser participantes en el posible servicio, ya que no lo consideran una necesidad inmediata en la actualidad.

Otro punto destacado por los comercios durante la consulta sobre su interés en el proyecto fue la importancia de la frecuencia. Dado el tipo de residuos involucrados, tanto en viviendas como en comercios, se dejó en evidencia que la regularidad de la recolección es un factor clave. En algunos casos, se mencionó que solo considerarían participar, si se ofreciera el servicio diariamente, de lunes a sábado. Sin embargo, la ENSVVR sugiere rutas específicas de RO con una

periodicidad de al menos dos días por semana (Ministerio de Salud, 2016b). Esto subraya la relevancia de la frecuencia como un aspecto vital a considerar en la planificación del proyecto.

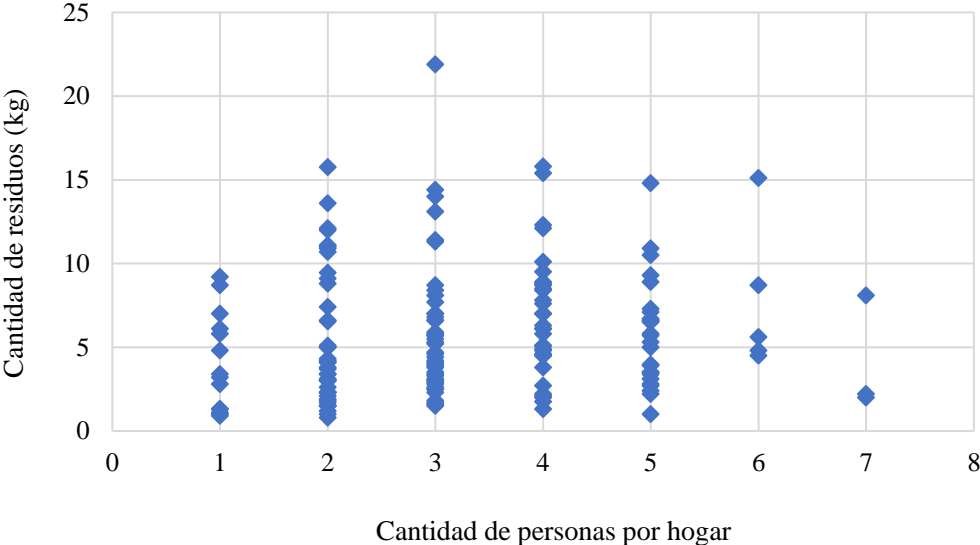
5.1.3 Generación de residuos orgánicos en viviendas

La muestra del estudio de generación de residuos orgánicos fue de 170 familias, de acuerdo con el resultado de la **Ecuación 2** de la fase 1 del proceso metodológico. En total, esta población consta de 561 individuos, distribuidos en familias con tamaños que varían de uno a siete miembros, presentando un promedio de 3,2 personas por vivienda.

La cantidad total de residuos orgánicos recolectados durante el estudio fue de 973,67 kg, con un promedio de 5,73 kg por vivienda. La cantidad más alta recogida en una vivienda alcanzó los 21,90 kg, mientras que la menor fue de 0,80 kg. En el Anexo 9 se puede consultar la información de las familias participantes con su respectivo código, cantidad de personas por vivienda, kilogramos generados y la generación per cápita.

Es importante destacar que, antes de la realización del estudio, se anticipaba un aumento proporcional en la generación de residuos orgánicos a medida que creciera el número de miembros en una vivienda. Sin embargo, los resultados contradicen esta expectativa, como se puede apreciar en la **Figura 27**, la cual ilustra la relación entre la cantidad de residuos orgánicos y el número de miembros por familia.

Figura 27
Correlación entre residuos orgánicos generados y cantidad de personas por vivienda



El gráfico anterior muestra una considerable dispersión de los datos, que no siguen un patrón a medida que la cantidad de personas por vivienda aumenta. Esta variabilidad se refleja en la desviación estándar, que alcanza los 3,78 kg. En cuanto al índice de generación per cápita, se obtuvo un rango de 0,03 a 1,31 kg/hab-día, con un promedio de 0,30 kg/hab-día. No obstante, se debe considerar que puede que algunas personas no hayan cumplido completamente con las instrucciones, que exigían almacenar durante una semana completa todos los residuos orgánicos generados en la vivienda. Aunque, se afirmó haber cumplido con lo solicitado, la baja generación presentada en algunos casos sugiere que, aparte de los hábitos de consumo, prácticas en la vivienda o la capacidad adquisitiva, no se debe descartar la posibilidad de incertidumbre debido a errores humanos en relación con el cumplimiento de la metodología.

En un estudio realizado por Herrera et al., (2016) en cuatro cantones de Costa Rica (San José, Alajuela, Belén y Barva), se determinó que la tasa de generación promedio ponderada de residuos ordinarios fue de 0,59 kg/hab-día en el área de estudio. De esta cantidad, los residuos orgánicos representaron el 55,9 %, lo cual indica que la generación específica per cápita de residuos orgánicos fue de 0,33 kg/hab-día, un valor muy similar al obtenido en la población de Guápiles.

En la misma línea, a través de los Planes Municipales de Gestión Integral de Residuos Sólidos de los cantones de Heredia y Turrialba, se pudieron determinar los promedios per cápita de residuos orgánicos, siendo en el caso de Heredia de 0,41 kg/hab-día, pero se evidencia una variación significativa en los índices generales de residuos ordinarios según el estrato social, aumentando conforme la capacidad adquisitiva (Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial [CEGESTI], 2020). En el cantón de Turrialba, este valor se sitúa alrededor de 0,28 kg/hab-día, muy similar al de la zona de estudio (ACEPESA, 2021).

5.1.4 Generación de residuos orgánicos en comercios

La muestra del estudio de generación abarcó a 47 comercios, conforme a lo establecido por la **Ecuación 1**, del proceso metodológico de la fase 1. Estos establecimientos incluyen carnicerías, sodas, panaderías, bares, restaurantes y verdulerías, que demostraron semejanzas en términos de la composición de los residuos generados y los métodos de disposición adoptados, de acuerdo con su tipo de actividad y cantidad de producción. La distribución porcentual de los sitios participantes reflejó de manera muy similar a los encuestados, con sodas, restaurantes, verdulerías y panaderías como los principales representantes (ver Figura 28).

Durante la semana de estudio, se registró una generación total de residuos orgánicos de 5 686,8 kg, con una media diaria de recolección de 1 197,7 kg y un mínimo de 855,4 kg. Sin embargo, es relevante destacar que no todos los comercios participantes entregaron sus residuos para el estudio, ya que, como se detalló en la metodología, muchos de ellos contaban con gestores dedicados a esta tarea específica. Por lo tanto, los datos de peso se obtuvieron mediante pesajes en campo o de información proporcionada por los comercios. Esta consideración es importante en caso de que las autoridades municipales decidan implementar un servicio similar en el futuro. Los sitios participantes con su respectivo código y total generado se pueden consultar en el **Anexo 10**.

El porcentaje de comercios participantes en el estudio según su tipo se presenta en la **Figura 28**, permitiendo contrastarla con la distribución de la generación de residuos por tipo de comercio de la **Figura 29**. Es posible notar que más del 50 % fue generado por verdulerías, seguido de restaurantes, sodas y supermercados. Las cantidades obtenidas no guardan relación proporcional con el número de sitios de cada categoría. Más bien, conforme a las tendencias observadas, se presume que está primordialmente influenciado por la naturaleza de las actividades de cada lugar, las características de los residuos que generan y el tamaño del establecimiento.

En el contexto de las verdulerías, se pudo observar y validar a través de los datos que generan volúmenes sustanciales de residuos diariamente. Aunque los restaurantes podrían parecer los mayores generadores debido a la naturaleza de sus operaciones, que involucran un procesamiento extenso de alimentos y una gran diversidad de residuos, las verdulerías han demostrado que ciertos factores influyen en su producción más alta. Esto no guarda relación con la cantidad de participantes, ya que el 17 % representado por las verdulerías generó el 58 % de los RO, como se ilustra en la comparación entre las **Figuras 28 y 29**. Además, el gráfico en la **Figura 30**, detallada las cantidades en kilogramos de los principales comercios generadores.

La ubicación es un factor clave en la generación de residuos en verdulerías y fruterías. En regiones tropicales con climas cálidos y húmedos, como la zona de estudio, las altas temperaturas aceleran la maduración y descomposición de frutas y verduras, aumentando las pérdidas. Como resultado, las verdulerías descartan más productos generando un aumento de RO en comparación con áreas de climas más frescos o con restaurantes en la misma zona. En el estudio sobre el desperdicio de alimentos en el mundo de la FAO (2012), se afirma que en países en desarrollo de climas calientes y húmedos estas pérdidas durante la postcosecha y distribución son graves debido al deterioro de los cultivos perecederos que imposibilita su venta.

En el caso de los supermercados, si bien el porcentaje generado no fue considerable respecto a otros comercios, que gran parte de su generación se debe al incumplimiento en los estándares de calidad. Muchos productos aún son aptos para el consumo, pero las políticas internas varían y son las que determinan la disposición. Se halló que uno de los participantes dona a organizaciones benéficas, mientras que los demás prohíben su consumo después de descartarlos. Ante esto, la FAO (2012) asegura que los consumidores comprarían productos heterogéneos si el sabor se mantiene, lo que podría influir en los estándares de calidad si se les ofrece una variedad más amplia. Para reducir estos residuos, la venta directa al consumidor, evitando o modificando los estándares estrictos de los supermercados, podría ser una solución efectiva.

Figura 28

Distribución porcentual de los tipos de comercios participantes

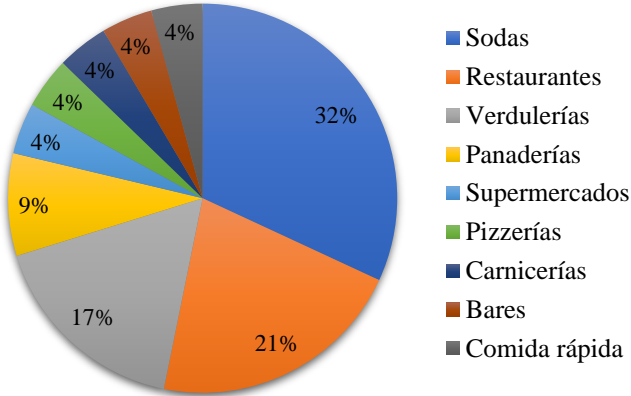
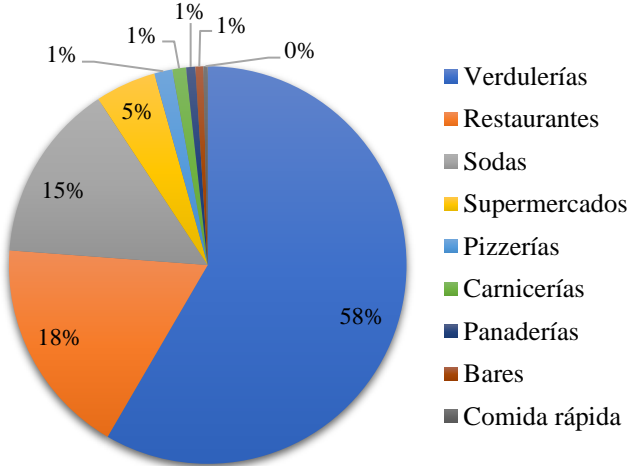


Figura 29

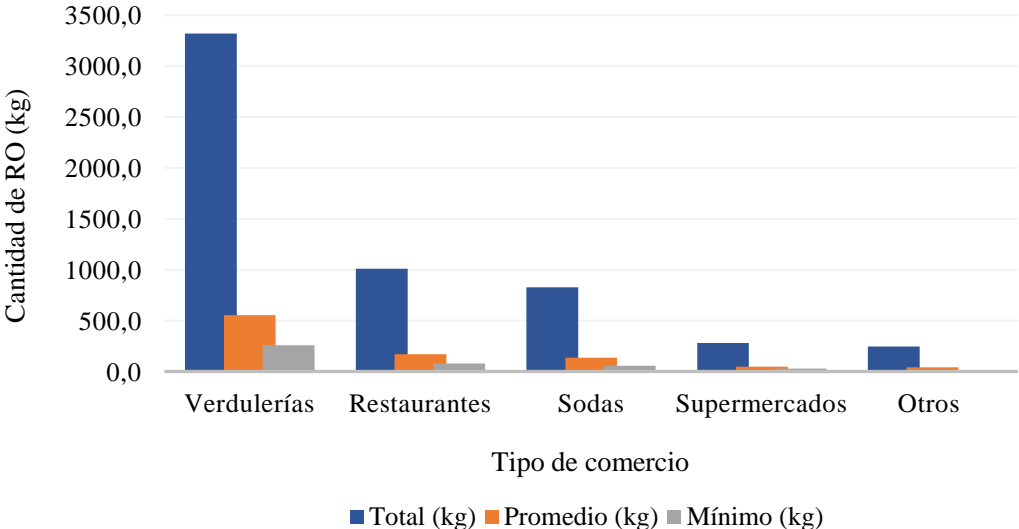
Porcentaje de generación por tipo de comercio



A pesar de que el número de sodas que participaron supera al de los restaurantes y que ambos sitios por la naturaleza de sus actividades generan residuos con características similares, los restaurantes generaron una mayor cantidad. Diversos factores pueden influir en el volumen de generación de residuos en un lugar, pero en este caso se considera que el tamaño, que diferencia ambos tipos de comercios, pudo ser una de las causas influyentes más significativas. Los comercios más grandes tienden a tener una mayor capacidad y volumen de operaciones, al ser capaces de atender a más clientes, almacenar más productos y generar mayores volúmenes de comida, lo que puede llevar a una mayor producción de residuos orgánicos.

No obstante, si bien el tamaño físico de ambos tipos de comercios puede influenciar el volumen de las ventas y de los residuos generados, es importante considerar que existen otros factores que pueden repercutir, tales como la ubicación del comercio, la calidad de productos y servicios que ofrece, reputación, precio, marketing, competencia en la zona y otros (Hidalgo, 2023). Teniendo en cuenta esto, se deben evaluar las prácticas y circunstancias individuales para comprender mejor los factores que influyen en la generación de residuos orgánicos en un sitio en particular.

Figura 30
Principales comercios generadores de residuos orgánicos (RO) y sus cantidades en kilogramos: análisis del total semanal, promedio diario y mínimo



Como se mencionó anteriormente, las verdulerías demostraron ser uno de los sitios que genera una mayor cantidad de RO en la zona estudiada, produciendo más de 3 ton de un total de 5,7 ton, seguido por los restaurantes y sodas con 1 010,5 kg y 826,8 kg, respectivamente. Una

característica observada de los residuos de las verdulerías es que por lo general son muy pesados y ocupan grandes volúmenes, almacenándose en uno o varios estañones. Estos corresponden principalmente a partes no comestibles como tallos, hojas o cáscaras, así como frutas y verduras enteras que al dañarse son desechadas, lo cual puede contribuir al peso y espacio que ocupan estos residuos debido al alto contenido de agua y fibra de este tipo de alimentos.

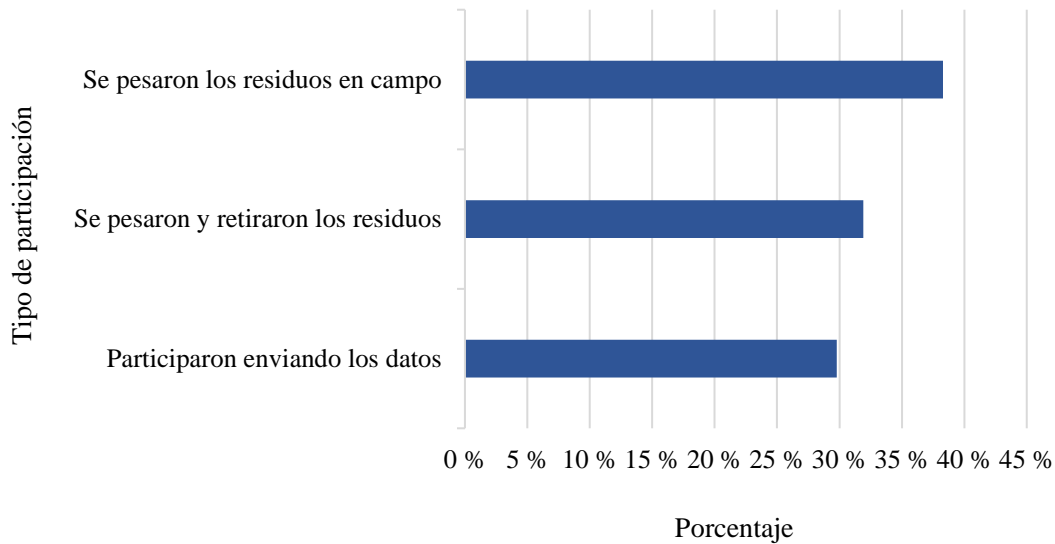
Es importante destacar que el 100 % de las verdulerías participantes separan y utilizan sus residuos como alimento para animales, como ganado vacuno, caballos o cerdos. En la mayoría de los casos, estos pertenecen a los propietarios de los negocios, aunque también existen algunas excepciones en las que estos establecimientos tienen acuerdos con otras personas en los que, a cambio de estos residuos considerados como productos no deseados, estas brindan el servicio de recolección según las necesidades de frecuencia establecidas por el comercio y los utilizan como insumo alimenticio para sus propios animales.

Durante el estudio, se observó que la mayoría de los comercios adopta un enfoque diferente para la gestión de este tipo de residuos, en lugar de enviarlos en el camión municipal hacia el relleno sanitario. Este hallazgo se basa tanto en los resultados de las encuestas realizadas como en el pesaje de las muestras. Algunos de los sitios no participaron debido a la necesidad de conservar sus propios residuos, mientras que otros aceptaron, pero con condiciones, como permitir solo el pesaje in situ y no la recolección, o enviar los datos de generación diaria. Estas condiciones surgieron principalmente porque los horarios de disposición no coincidían con el horario municipal del estudio, prefiriendo hacer uso de su servicio actual en el que se les recolectan los residuos en horas nocturnas, por ejemplo, en lugar de almacenarlos y proporcionarlos para el pesaje.

Por lo tanto, las muestras se dividieron en tres grupos que se pueden observar en la Figura 31. El primero, conformado por el 38 % de los comercios, corresponde a aquellos que separan los RO y poseen un gestor que los recoge, generalmente de forma diaria o cada dos o tres días, dependiendo del volumen de generación. A este grupo se les hizo el pesaje en campo, pero los residuos no fueron retirados del sitio debido a que los necesitaban. El segundo, con un 32 %, son aquellos a los que también se les realizó el pesaje en campo, pero además se les retiraron, ya que la mayoría no separa y lo realizaron únicamente para colaborar con el estudio. El tercero, del 30 %, concierne a quienes no fue posible pesarles en campo, por lo que ellos pesaron y enviaron los datos de generación diaria junto a fotografías como evidencia.

Figura 31

Medio de participación de los diferentes comercios para la cuantificación de los residuos

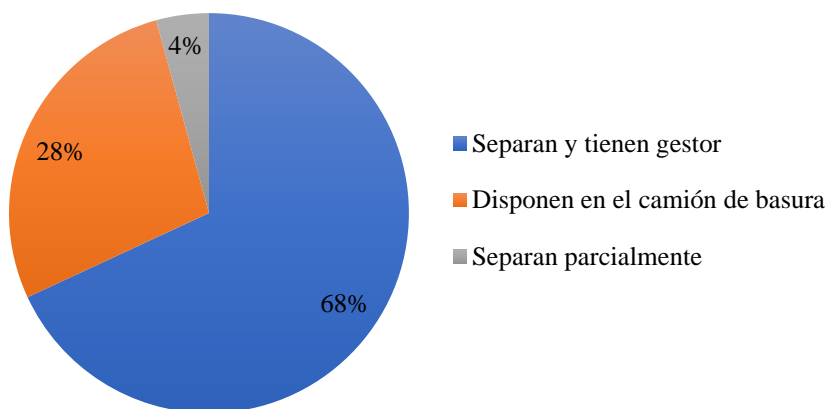


Es importante comprender cómo participaron los comercios, ya que esto revela las distintas prácticas y las adaptaciones que fueron necesarias para obtener la información. Cabe destacar que la dinámica en el sector comercial difiere significativamente de la residencial, que suele presentar métodos de disposición más similares. En el caso de los comercios, cada uno posee horarios y prácticas diferentes, lo que añadió mayor complejidad al momento de realizar los pesajes. Además, es necesario señalar que los datos enviados incrementan el nivel de incertidumbre, ya que se usaron instrumentos de pesaje variados en lugar de la misma balanza de los dos primeros grupos.

En el primer grupo, todos los participantes separan habitualmente los RO y los gestionan utilizando un medio distinto al del camión municipal de basura. En los otros dos grupos, una parte indicó separar y utilizar los residuos como alimento animal o para producir abono, mientras que la otra aún los envía al relleno sanitario. En el segundo grupo, el 27 % separa y utiliza todos los RO, el 13 % usa una parte y la otra parte la desecha en el camión municipal, y el 60 % no realiza ninguna separación ni aprovechamiento de los RO. En el tercer grupo, el 71 % separa y aprovecha los RO, mientras que el 29 % los desecha en el camión municipal. Al realizar una división de la totalidad de la muestra entre los que separan todos los RO, los que separan parcialmente y los que disponen en el camión municipal de basura, da como resultado el gráfico de la **Figura 32**.

Figura 32

Gestión de RO en comercios: separación total, parcial y disposición en el camión municipal



El gráfico anterior muestra la disposición de RO de comercios en tres grupos distintos. El primer grupo (68 %) se destaca por separar y aprovechar todos los residuos con un gestor, promoviendo la economía circular y evitando el envío a rellenos sanitarios. En contraste, el segundo grupo (28 %) no realiza ninguna separación y los dispone directamente en el camión municipal de basura. Esta falta de separación y aprovechamiento representa una oportunidad perdida para reducir el impacto ambiental negativo. El tercer grupo (4 %) hace una separación parcial, aprovechando algunos, pero enviando otros al camión municipal, por lo que hay un margen de mejora en el aumento de la proporción de RO aprovechados en su totalidad.

Se resalta así mismo, la relevancia de implementar medidas que fomenten la economía circular en la gestión de los RO generados por los comercios. La separación completa y el aprovechamiento de estos residuos mediante un gestor especializado se posicionan como una estrategia efectiva para reducir la cantidad destinada a los rellenos sanitarios y minimizar el impacto ambiental. Para la Municipalidad de Pococí, interesada en abordar esta problemática, esta información ofrece una visión clara de las prácticas actuales determinadas a través de estudio en campo que refuerza la información obtenida en el apartado “6.1.2.1 Encuestas del sector comercial” para comprender estas dinámicas en su territorio.

5.2 Pruebas de compostaje

Esta sección presenta los resultados y discusión relacionada con el segundo objetivo. El propósito de este apartado fue determinar, a través de pruebas de compostaje, si existe alguna de las variaciones de compostaje implementadas que logra una mayor calidad nutricional y eficiencia

en el tiempo de descomposición. Estas pruebas se llevaron a cabo en campo bajo condiciones controladas, donde se manipularon variables independientes como la aireación y la humedad para evaluar su impacto en las dependientes, como el pH, la temperatura, los nutrientes, entre otros. Estos hallazgos no solo proporcionaron una comprensión más clara sobre la elección del activador biológico más eficaz, sino que también que se sientan las bases para el desarrollo de la propuesta, de la siguiente fase del proyecto.

5.2.1 Comportamiento de los parámetros durante el proceso de compostaje

Durante un período de 10 semanas, se llevó a cabo un seguimiento del proceso de descomposición de las pilas de compostaje mediante mediciones de temperatura y pH realizadas tres días por semana. Estas mediciones proporcionaron una visión detallada del comportamiento de las pilas a lo largo del proceso, así como la influencia de los volteos y riegos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de estos parámetros:

5.2.1.1 Temperatura

La temperatura es un indicador fundamental de la actividad microbiana durante el proceso de compostaje y de la estabilidad del producto final. En la etapa inicial, se atraviesa una fase mesófila en la que el material compostable se encuentra a temperatura uniforme por debajo de los 40 °C (Margaritis et al., 2023). Si las condiciones son adecuadas, los microorganismos aumentan su actividad, produciendo una emisión de calor hasta superar rápidamente el límite mesófilo (40°C) en cuestión de horas o pocos días después del inicio del proceso, marcando la transición hacia la fase termófila (Chi et al., 2023).

Los tres tratamientos tuvieron cambios similares en la temperatura, superando el límite de 40 °C en el segundo día para las 10 pruebas (Figuras 33, 34 y 35). Este incremento de temperatura indica el inicio de la actividad microbiana, en la que los microorganismos termófilos ganan competitividad frente a los mesófilos y se convierten en la especie dominante (Margaritis et al., 2023). La temperatura continuó subiendo hasta sobrepasar los 50 °C al sexto día en todas las pilas, excepto en el tratamiento 1 (T1A y T1C) que solo tenía MM como activador biológico, el cual pudo verse afectado por la humedad de las pilas o la eficiencia del aditivo o fue tan buena como el compost maduro agregado a los tratamientos 2 y 3. La etapa termófila se mantuvo durante un periodo de 13 días y las pilas alcanzaron la temperatura máxima en los días 6 (T1B, T2C, T3A, B y C) y 10 (T0, T1A y C, T2A y B), estas últimas, posterior al primer volteo realizado el octavo día.

Figura 33

Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje entre los tres tratamientos con MM como activador biológico (T1), el sistema de control (T0) y la temperatura ambiente (T.^a)

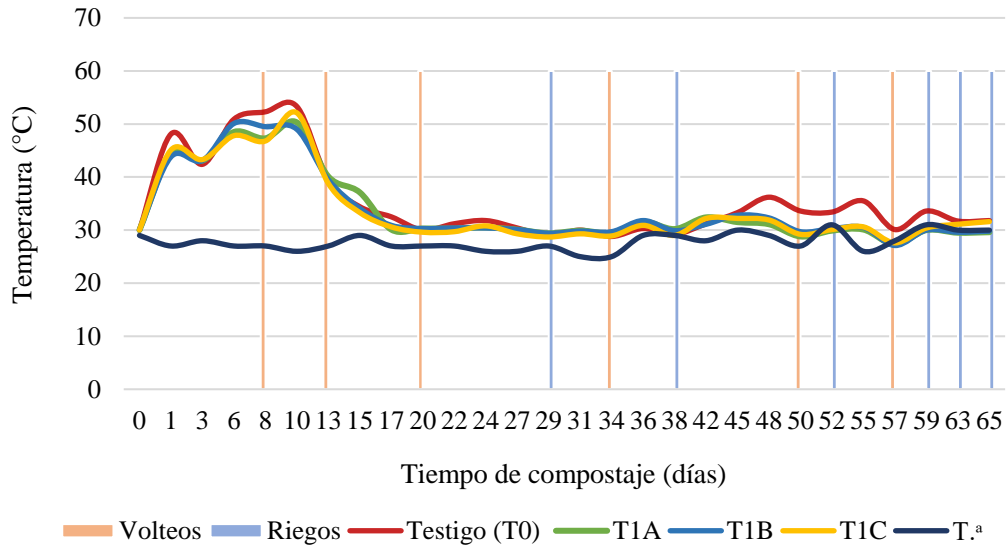


Figura 34

Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje entre los tres tratamientos con compost maduro como activador biológico (T2), el sistema de control (T0) y la temperatura ambiente (T.^a)

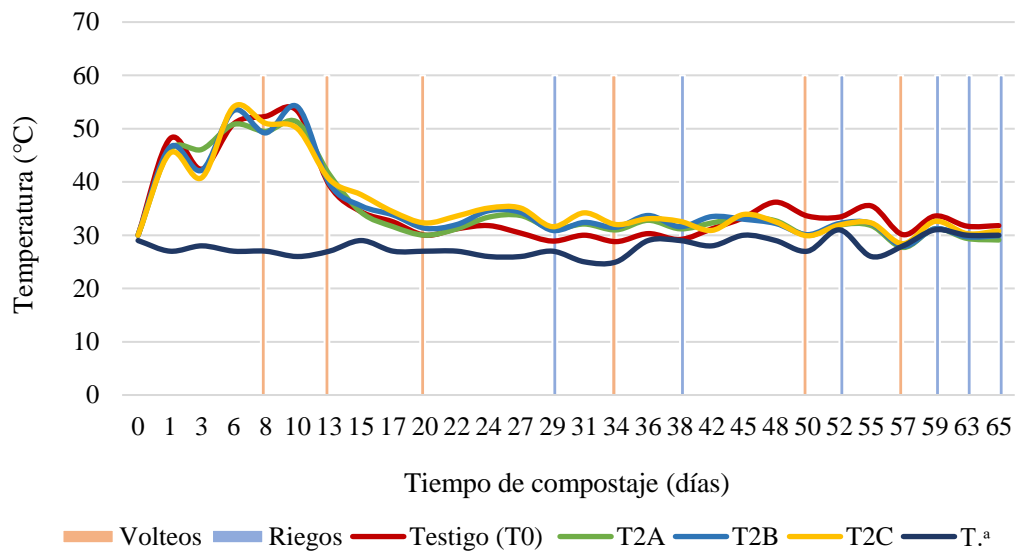
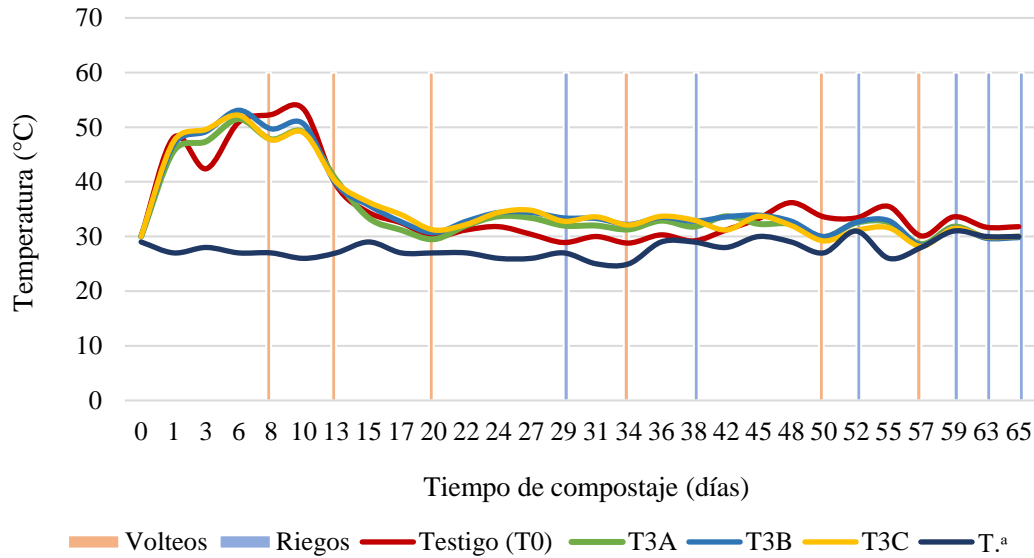


Figura 35

Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje entre los tres tratamientos con MM y compost maduro como activadores (T3), el sistema de control (T0) y la temperatura ambiente (T.^a)



La investigación de Pandey et al., (2016) señala que lograr que la temperatura supere los 55,0 °C durante el proceso de compostaje de RO mixtos, que incluyen residuos de alimentos mezclados con residuos verdes, puede presentar un desafío, especialmente en unidades de compostaje a menor escala. Esto sugiere que el tipo y la cantidad de RO agregados a cada pila podrían haber sido factores determinantes en la limitación para superar este umbral de temperatura. No obstante, es importante destacar que este hecho no obstaculizó el avance del proceso de degradación del material. A continuación, en la **Tabla 11**, se detallan los valores máximos de temperatura obtenidos por cada pila y el tiempo requerido para alcanzarlos.

Tabla 11*Temperatura máxima obtenida por los tratamientos en la etapa termófila ($T > 40$ °C), 2023*

Tratamiento	Temperatura máxima (°C)	Tiempo en el que alcanzó
T0	53,3 ± 0,5	10 días (2. ^a semana)
T1 A	50,3 ± 0,5	10 días (2. ^a semana)
T1 B	50,1 ± 0,5	06 días (2. ^a semana)
T1 C	52,1 ± 0,5	10 días (2. ^a semana)
T2 A	51,2 ± 0,5	10 días (2. ^a semana)
T2 B	54,1 ± 0,5	10 días (2. ^a semana)
T2 C	54,1 ± 0,5	06 días (2. ^a semana)
T3 A	51,5 ± 0,5	06 días (2. ^a semana)
T3 B	53,1 ± 0,5	06 días (2. ^a semana)
T3 C	52,2 ± 0,5	06 días (2. ^a semana)

El tratamiento T2, alcanzó las temperaturas más elevadas, mientras que el T1 registró las más bajas. Esto indica que la adición de MM no ejerció un impacto significativo en la actividad microbiana de las pilas. En caso contrario, se esperaba que el tratamiento T3, que incorpora MM y compost maduro, mostrara temperaturas más altas y un menor tiempo de descomposición, lo cual no ocurrió de esta manera. Estos resultados contrastan con otros estudios como los realizados por Sánchez y Domínguez (2020), Pérez (2018) y Moreto y Delgado (2019), en los que también se usaron microorganismos, pero en forma líquida, y obtuvieron resultados satisfactorios, lo cual podría indicar que el tipo específico de MM en polvo que se utilizó no fue tan beneficioso. Además, es interesante observar que el tratamiento de control T0 obtuvo la segunda temperatura más alta con 53,3 °C, pero también presentó el período más prolongado de tratamiento. La curva de evolución térmica revela que al final de los 65 días, T0 era la que mantenía la temperatura más alta y alejada de la ambiental, sin lograr igualarla, en contraste con la mayoría de los otros tratamientos (Figuras 33, 34 y 35).

Los gráficos revelan un aumento significativo de la temperatura a partir del segundo día, pero en el día 3 se evidencia un descenso marcado, especialmente en los tratamientos T0, T1, T2B y T2C. Este patrón de comportamiento estuvo ligado a las condiciones climáticas de la zona de estudio y al acondicionamiento inadecuado del área experimental. En ese punto, se notó que las fuertes lluvias acompañadas de vientos habían afectado de manera notable la humedad y, como resultado, la temperatura de las pilas. Según Rastrogi et al., (2020), esto se debe a que el exceso

de humedad satura el espacio poroso, disminuyendo la disponibilidad de oxígeno y la actividad microbiana, lo que impacta negativamente en la temperatura del compostaje.

El contenido de humedad desempeña un papel crítico en el proceso de compostaje que influye significativamente en su eficacia. Según diversos autores, el rango óptimo que provee un ambiente adecuado para la actividad metabólica microbiana y el procesamiento de los residuos orgánicos es del 50 % al 60 % (Peng et al., 2022., Rastroggi et al., 2020 y Ermolaev et al., 2019). Tanto la falta como el exceso de humedad pueden ser perjudiciales. Un bajo contenido (35 % al 40 %), dificulta los procesos biológicos y valores inferiores al 30 % los eliminan. A su vez, el exceso de agua, superior al 65 %, tiende a crear condiciones anaeróbicas debido a la disminución de la porosidad en el material. Por lo tanto, se considera que un rango del 45 % al 65 % es apropiado para el éxito del compostaje y evitar problemas relacionados con la humedad (Margaritis et al., 2023).

Se comprobó que no solo el clima y el diseño del sitio de tratamiento requerían atención especial, sino también la ubicación específica de las pilas. El exceso de humedad se manifestó en mayor proporción en las pilas situadas en el lado izquierdo (Figura 10), pero también alcanzó las ubicadas en el área central y frontal a causa de la dirección del viento durante las fuertes lluvias. En cambio, las pilas T3, posicionadas a la derecha, experimentaron un impacto menor. Esto resalta la importancia de considerar la fuerza y la dirección de los vientos, en especial en zonas con alta humedad y precipitaciones frecuentes, como factores significativos que pueden influir en el desarrollo del proceso de compostaje.

Al comenzar la segunda semana, se solucionó este inconveniente mediante la instalación de una malla sarán que previno la entrada de lluvias durante el resto del proceso. Sin embargo, un día antes de la colocación de la malla, se produjo otra intensa lluvia que volvió a impactar en las pilas, incluyendo a las T3, especialmente en el día 8, prolongando el exceso de humedad hasta el día 13. A pesar de que es evidente este segundo descenso de la temperatura en la mayoría de las pilas, esto no impidió que se mantuvieran en el rango termófilo (40 °C - 70 °C), e incluso, que la mitad de ellas registraran las temperaturas más altas en el décimo día. No obstante, durante ese periodo en el que las pilas presentaron una humedad excesiva, se percibió un fuerte olor a amoníaco.

La aparición de este olor se debe a que, si la humedad es muy elevada, las condiciones anaeróbicas influyen en las emisiones de amoníaco (NH₃) y de gases de efecto invernadero (GEI), como óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄), lo cual impacta el valor agronómico del compost y su

contribución al cambio climático (Ermolaev et al., 2019). La volatilización del NH_3 produce ese característico olor y se genera debido a la amonificación del nitrógeno orgánico, como aminoácidos y proteínas, en ambientes anaeróbicos durante la fase termofílica del proceso. Las altas temperaturas y el pH alcalino favorecen su liberación, ocasionando pérdidas de nitrógeno (Cao et al., 2019). Asimismo, la reducción de oxígeno ralentiza el proceso, volviéndolo menos eficiente (Rastogi et al., 2020). Mientras que, si el contenido de humedad es adecuado, los microorganismos generan dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (Chi et al., 2023).

A partir de la tercera semana, se observó una notable disminución en la temperatura de todas las pilas, llegando a acercarse a la temperatura ambiente. A pesar del volteo realizado en el día 13, no se registró un aumento significativo, lo que marcó el final de la fase termofílica. Un nuevo volteo en el día 20 provocó un ligero incremento en la temperatura de todas las pilas, aunque no de manera significativa, manteniendo un promedio cercano a los 32 °C durante el resto del proceso. Además, se notó que tanto los volteos como los riegos influyeron positivamente sobre las temperaturas, generando aumentos ligeros que respondían a las necesidades de aireación o humedad de las pilas.

Estos incrementos en las temperaturas luego de los volteos y riegos se deben a que, al igual que con la humedad, la cantidad de oxígeno disponible está estrechamente vinculada con la actividad microbiana, la cual requiere de un suministro adecuado para la oxidación de la materia orgánica y la evaporación del exceso de humedad, siendo considerado otro factor clave en la eficiencia del compostaje (Chi et al., 2023). Por lo tanto, la respuesta en el aumento de temperatura indica que se satisficieron las demandas de agua y oxígeno de los microorganismos, lo que se tradujo en un aumento de su actividad, generando calor como resultado.

Según Chi et al., (2023), la aireación influye sobre la estabilidad del compost y sus propiedades fisicoquímicas, y al contrario que la humedad, si es insuficiente puede favorecer el desarrollo de condiciones anaeróbicas. Asimismo, un nivel de aireación apropiado puede ayudar al proceso a alcanzar la fase termofílica en 3 días y mantenerla durante un máximo de 15 días. En el contexto de las pruebas realizadas, se logró entrar en la fase termofílica desde el segundo día y se mantuvo durante 13 días, lo cual sugiere que las condiciones de aireación fueron apropiadas. Sin embargo, es posible que la exposición al exceso de humedad debido a las lluvias haya contribuido a acortar esta etapa o a limitar que se alcanzaran mayores temperaturas.

Cuando se terminan las fuentes de nitrógeno y carbono fácilmente degradables, como azúcares, almidones y proteínas, la temperatura comienza a descender por debajo de los 40,0 °C,

indicando el cambio de la fase termofílica a la mesofílica 2 o de enfriamiento, en la cual los microorganismos mesófilos retoman su actividad y se continúa la degradación de los polímeros de celulosa y de compuestos orgánicos más resistentes, como la celulosa, lignina y otros componentes orgánicos recalcitrantes. Además, esta fase puede extenderse durante varias semanas y a menudo se confunde con la fase de maduración (Montero, 2019). En los tres gráficos (Figuras 32, 33 y 34) se puede apreciar a través de la evolución térmica que esta fue la fase más larga del proceso, prolongándose alrededor de 43 días.

Un estudio realizado por Dume et al., (2023) reveló que una mayor relación C/N inicial generó una descomposición termófila más rápida durante los primeros 10 a 14 días. Sin embargo, durante la fase mesófila 2 produjo los niveles de temperatura más bajos a causa del agotamiento de los compuestos orgánicos fácilmente degradables. Los patrones de temperatura en las gráficas de las **Figuras 33, 34 y 35** de este estudio reflejaron una evolución similar a la presentada por Dume et al., (2023), lo que sugiere que la relación C/N inicial, podría ser uno de los factores que prolongaron esta etapa, debido a la disponibilidad limitada de nitrógeno. No obstante, se debe tener en cuenta que múltiples factores interconectados, como la reducción de oxígeno debido al exceso de humedad, también pudo influir en la ralentización de esta fase, como mencionó Rastogi et al., (2020).

En el sexto día del proceso, se detectaron numerosas germinaciones, las cuales desaparecieron tras atravesar la fase termófila. Sin embargo, durante esta fase de enfriamiento, se detectaron algunas nuevas, indicando que las temperaturas óptimas para la higienización e inactivación de semillas de malezas no se alcanzaron completamente, de acuerdo con lo indicado por Peng et al., (2023) y Montero (2019). También se observó la aparición de hongos en residuos de descomposición lenta, como mazorcas de maíz. De acuerdo con Langarica et al., (2014), es común la aparición de estos organismos en la etapa mesófila y desempeñan un papel esencial al ser capaces de descomponer materiales resistentes como la celulosa y la lignina, además de RO demasiado secos, ácidos o bajos en nitrógeno para las bacterianas.

A pesar de haber cumplido las 8 semanas iniciales estipuladas para el proceso de descomposición, las pilas continuaban manteniendo temperaturas por encima de la ambiental, indicando que aún no había finalizado la descomposición, lo que llevó a extender el proceso durante dos semanas adicionales. Para el día 57, todas las pilas, excepto la de control T0, habían alcanzado valores cercanos o inferiores a la temperatura ambiente. Aunque según la metodología no estaba programado un volteo esa semana, se llevó a cabo uno final para evaluar si esto

reactivaba la actividad microbiana o se mantenían las temperaturas alrededor de la ambiental, indicando la finalización de la fase mesófila 2.

Después del último volteo en el día 57, se comprobó que la mayoría de las pilas mantenían temperaturas cercanas a la ambiental, con la excepción de T0, T1C y T2C, que mostraron un incremento relativo de signos de actividad microbiana. La mayor discrepancia con la temperatura ambiente se observó en T0 durante todo el proceso, llegando a superarla en casi 2 °C para el día 65. En contraste, el tratamiento T3 fue el único en el que las tres réplicas se encontraron por debajo de la temperatura ambiente en el día 65, aunque en el caso de las que la superaron, lo hicieron por muy poco, excepto en las T0, T1C y T2C, donde la diferencia continuó siendo más pronunciada.

Esto sugiere que, aunque no se observaron diferencias significativas de la temperatura entre los tratamientos, se pudo notar una aceleración en el tiempo de descomposición en comparación con el método convencional, representado por la prueba de control que no empleó activadores biológicos. Este hallazgo indica que, tanto los MM y el compost maduro como aditivos podrían tener un impacto positivo en la reducción del proceso de degradación de la materia orgánica. Sin embargo, cabe destacar que, al comparar los valores promedio máximos de temperatura alcanzados por cada tratamiento, las pilas T2 y T3 que poseían compost maduro alcanzaron hasta 2 °C más, revelando una mejor activación microbiana.

5.2.1.2 pH (concentración de iones de hidronio)

El grado de acidez o alcalinidad es otro factor fundamental en el proceso de compostaje, debido a que interviene en la selección de los microorganismos que pueden sobrevivir y, por ende, en la capacidad de descomposición de la materia orgánica (Margaritis et al., 2023). Este parámetro está estrechamente vinculado con la composición de los materiales utilizados como base y experimenta cambios a lo largo de las diferentes fases del proceso, conforme se desarrollan las condiciones y reacciones específicas (Montero, 2019).

Al iniciar el proceso de compostaje, es común que el pH se encuentre ácido, debido a la formación de ácidos orgánicos por parte de los microorganismos involucrados (Montero, 2019). Además, cuando los materiales a compostar consisten principalmente en residuos de cocina, la humedad presente en estos puede provocar procesos de hidrólisis durante su transporte y almacenamiento, lo que incita la generación de ácidos orgánicos y, en consecuencia, a la acidificación del sustrato (Peng et al., 2023). Este es el caso de los resultados de las pruebas realizadas, donde los residuos de cocina utilizados, tanto crudos como cocinados, tenían altos

niveles de humedad, lo que resultó en un pH inicial bajo en todos los grupos de prueba desde el primer día (Figuras 36, 37 y 38).

Al inicio de las pruebas, los tratamientos T1 mantuvieron niveles de pH en un rango ácido, oscilando entre 4,73 y 5,32, al igual que el T0 con un valor de 5,00. Por otro lado, el T2 mostró un rango más amplio, variando de 4,79 a 7,22, con el valor máximo correspondiente a T2C, que presentó un pH alcalino desde el primer día. El tratamiento T3 registró valores de 5,16 a 6,73, siendo el T3A ligeramente más alcalino que los demás. Posteriormente, en el tercer día, se observó un aumento significativo en todos los tratamientos, con un mínimo de 8,35 (T1C) y un máximo de 9,33 (T3A). Sin embargo, hasta ese punto, no se observaron diferencias importantes entre las tres variaciones de compostaje.

El estudio de Young et al., (2020) arrojó resultados similares, donde las tendencias entre los tratamientos no mostraron contrastes significativos. A su vez, la prueba de control (residuos + burucha de madera) comenzó con un pH más ácido, alrededor de 5, en comparación con las pruebas que incluyeron compost maduro como activador microbiano, las cuales iniciaron con un valor aproximado de 6, incluso superándolo. Esto sugiere que la composición de los materiales a compostar, tanto el tipo de residuos como los aditivos utilizados, puede influir en el grado inicial de acidez del sustrato, concordando con lo mencionado por Peng et al., (2023).

El aumento posterior en el pH observado en las pruebas es un comportamiento común en el proceso de compostaje y se debe principalmente a la formación de amonio (NH_4). Los microorganismos descomponen compuestos orgánicos nitrogenados, como las proteínas, presentes en los residuos lignocelulósicos, transformando el nitrógeno en NH_4 mediante el proceso llamado amonificación. Dependiendo de las condiciones ambientales como temperatura, humedad y pH, el NH_4 puede transformarse en amoniaco (NH_3), un compuesto alcalino que, al acumularse en el compostaje, eleva el pH del sustrato (Chi et al., 2023 y Dume et al., 2023).

El microambiente durante el compostaje afecta el equilibrio dinámico entre NH_4^+ y NH_3 , así como la volatilización de ácidos orgánicos. Estas reacciones son en gran medida responsables de explicar los aumentos y descensos en el pH durante el proceso. Si el NH_3 se acumula en el compost puede elevar el pH por encima de 8, pero este compuesto es altamente volátil. En este sentido, la temperatura desempeña un papel esencial, ya que cuando las temperaturas son altas provocan la volatilización de los ácidos orgánicos y la liberación de NH_3 , lo que puede dar lugar a una posterior disminución del pH (Rastogi et al., 2020).

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan similitudes con investigaciones previas, como las realizadas por Feng et al., (2021) y Young et al., (2020). Estos estudios también observaron un patrón similar en el compostaje, caracterizado por valores iniciales de pH ácido, seguido de un aumento significativo, que mantuvo los sustratos en un estado alcalino durante el resto del proceso. Este cambio en el pH se atribuyó a los procesos de proteólisis y amonificación, que condujeron a la acumulación de amoníaco (NH_3). Además, las altas temperaturas y el pH alcalino favorecieron la volatilización, tanto del NH_3 como de los ácidos orgánicos, lo cual, dependiendo de la manera y grado en que esto se desarrolle, influye sobre la tendencia del pH a lo largo del proceso.

Al finalizar las pruebas de compostaje en la semana 10, se observaron diferentes valores de pH en los tratamientos evaluados. El tratamiento de control T0 registró el pH más alcalino, con un valor de 9,76. En comparación, el T1 osciló en un rango de 9,33 a 9,42, el T2 entre 8,97 y 9,06, y el T3 entre 9,06 y 9,18. Estos resultados revelan diferencias entre los tratamientos, destacando que el sistema de control (T0) y el T1 exhibieron los niveles de pH más alcalinos (ver Figura 36). En comparación, el T2, seguido de T3, aunque también alcalinos, se aproximaron más a los rangos recomendados. La variación entre estos tratamientos y T0 puede apreciarse en las Figuras 37 y 38, en las que se observa la diferencia al final del proceso.

Figura 36

Evolución del pH entre los tres tratamientos con MM (T1) y el sistema de control (T0)

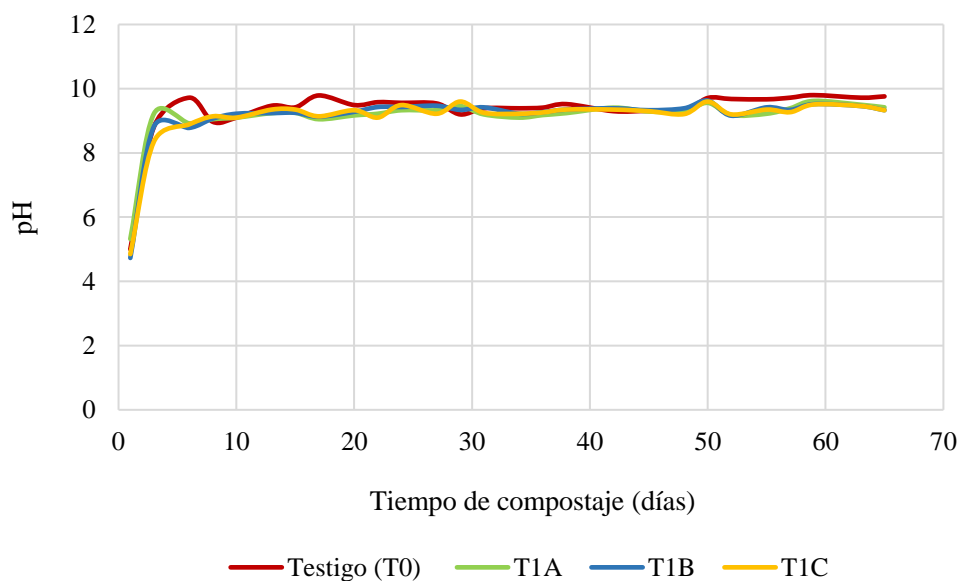


Figura 37

Evolución del pH entre los tres tratamientos con compost maduro (T2) y el sistema de control (T0)

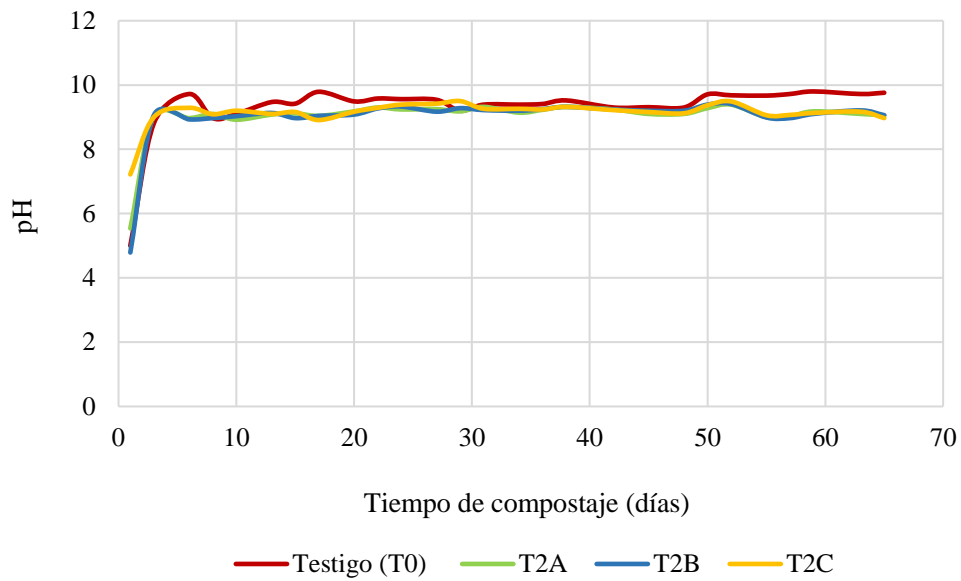
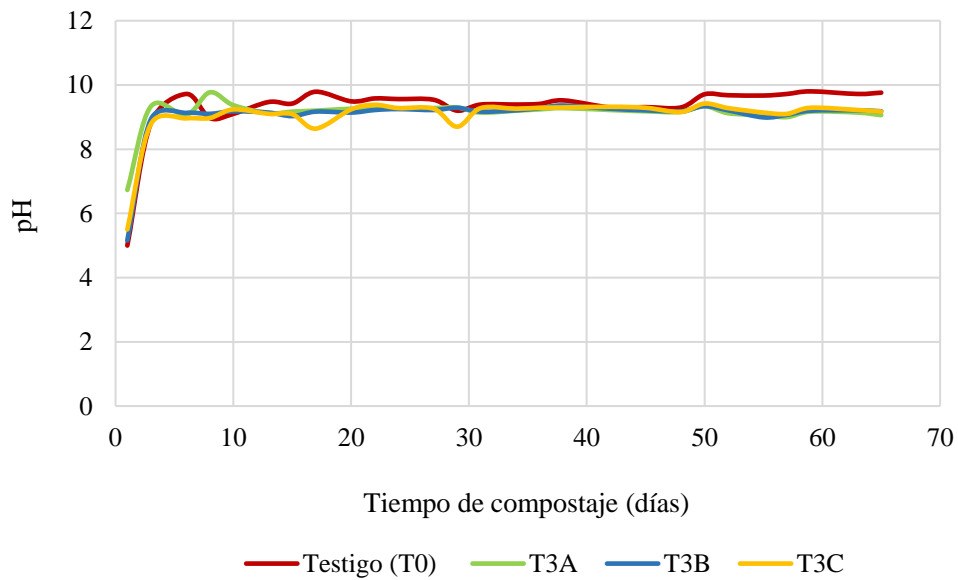


Figura 38

Evolución del pH entre los tres tratamientos con MM y compost maduro como activadores (T3) y el sistema de control (T0)



Varios expertos han sugerido diferentes rangos de pH óptimo para el compost, que varían según los objetivos específicos. Algunos autores proponen un rango de 5,5 a 8,0 (Zhang & Sun, 2016), otros indican que valores entre 6,0 y 9,0 son ideales (Nakasaki, citado por Cao et al., 2019), y algunos sugieren un pH deseado entre 7 y 8 (Fouguitara, 2023), o incluso amplían el rango de 7 a 9 (Margaritis et al., 2023 y Rastrogi et al., 2020) para promover la fermentación aeróbica y la actividad microbiana durante el proceso. Sin embargo, Moubareck et al., (2023) señala que el pH del producto final, que se utilizará como abono, debe preferiblemente ser de moderadamente ácido a moderadamente básico, oscilando entre 6 y 8 para el óptimo crecimiento de las plantas.

La obtención de valores de pH alcalinos al final del proceso indica que el compost aún no ha alcanzado la estabilidad y madurez deseada, lo que sugiere que necesita un mayor tiempo de estabilización y maduración para llegar a niveles más cercanos a la neutralidad (Margaritis et al., 2023). Además, según Xie et al., (2023), cuando el $\text{pH} > 9$ se limita la actividad microbiana y aumenta la liberación de amoníaco (NH_3), principalmente durante la fase termofílica, lo que puede resultar en la pérdida de nutrientes como el nitrógeno, afectando la calidad del producto final.

5.2.2 Determinación de la calidad del producto final

5.2.2.1 Análisis de los resultados de laboratorio

Los resultados de pH, detallados en la **Tabla 12**, indican que todos los sistemas muestran un pH alcalino. Al comparar los tratamientos, se observa que los valores del T3 son los más cercanos al rango especificado por la norma NCh2880, siendo el T3A el único que cumple con dicho rango. En contraste, el T1 supera significativamente el límite, manteniendo la alcalinidad observada durante el proceso (ver Figura 36). Los demás tratamientos, incluyendo el de control, presentaron una reducción en la alcalinidad respecto a la última medición previa al periodo de maduración, denotando una mayor estabilidad.

Tabla 12

Resultados de pH, % de humedad y relación C/N de los diferentes tratamientos y comparación con la norma NCh2880

Tratamientos		*pH	**Humedad (%)	**Relación C/N
Control (T0)		9,03 ± 0,04	12,64 ± 0,63	10,8
T1A		9,70 ± 0,04	14,93 ± 0,63	12,6
T1C		9,59 ± 0,04	13,74 ± 0,67	12,6
T2A		8,57 ± 0,04	11,90 ± 0,63	10,0
T2C		8,63 ± 0,04	11,51 ± 0,85	10,4
T3A		8,41 ± 0,04	11,18 ± 0,82	10,9
T3C		8,57 ± 0,04	11,01 ± 0,63	10,7
Norma NCH2880	Clase A	5 – 8,5	30 – 45	≤ 25
	Clase B			≤ 30

*Ensayos acreditados bajo la norma ISO 17025:2017, Alcance LE-024, más información en el sitio web www.eca.or.cr

**Ensayos no acreditados

Aunque el control (T0) presentó la mayor alcalinidad al inicio del periodo de maduración, al finalizar, el T1 exhibe los valores más alcalinos entre todos los tratamientos, incluso superando a T0. Este cambio sugiere un período de degradación más prolongado para el compost del T1, indicando la posible necesidad de una fase adicional de estabilización y maduración (Margaritis et al., 2023). Esta persistente alcalinidad podría relacionarse con la acumulación de sustancias como el amoníaco (NH₃), influenciada por diversos factores, como el tipo de materiales empleados, su pH inicial y las condiciones ambientales, incluyendo niveles de humedad y temperatura (Dume et al., 2023 y Rastogi et al., 2020).

Por su parte, los resultados del contenido de humedad indican que, a pesar de las condiciones climáticas húmedas de la zona y los desafíos asociados con el exceso de humedad durante el proceso, los porcentajes obtenidos para todos los tratamientos están por debajo del rango establecido por la Normativa Chilena (30 % - 45 %). En general, tanto el T1 como el T0 exhibieron valores más próximos al rango recomendado, especialmente el T1A, aunque todavía se encuentra considerablemente distante. Por otro lado, los sistemas correspondientes a los tratamientos 2 y 3 presentaron los porcentajes más bajos, alrededor del 11 %, siendo ligeramente menores en el T3, posicionándose como el tratamiento con el menor contenido de humedad.

Los resultados concuerdan con la evaluación cualitativa de la humedad observada durante el tamizaje de las pilas, un día antes de la toma de muestras, donde las del T1 mostraron una mayor humedad evidente en la prueba de puño y en las operaciones de tamizaje. Es crucial señalar que

los resultados se pudieron ver afectados por inconvenientes técnicos en el laboratorio encargado de los análisis, debido a que un equipo dañado obligó a la preservación de las muestras, durante aproximadamente un mes y medio antes de su procesamiento. Este contratiempo podría haber influido en la precisión de los valores, resultando en una disminución del porcentaje de humedad, lo cual es un factor externo que debe ser considerado al interpretar los resultados.

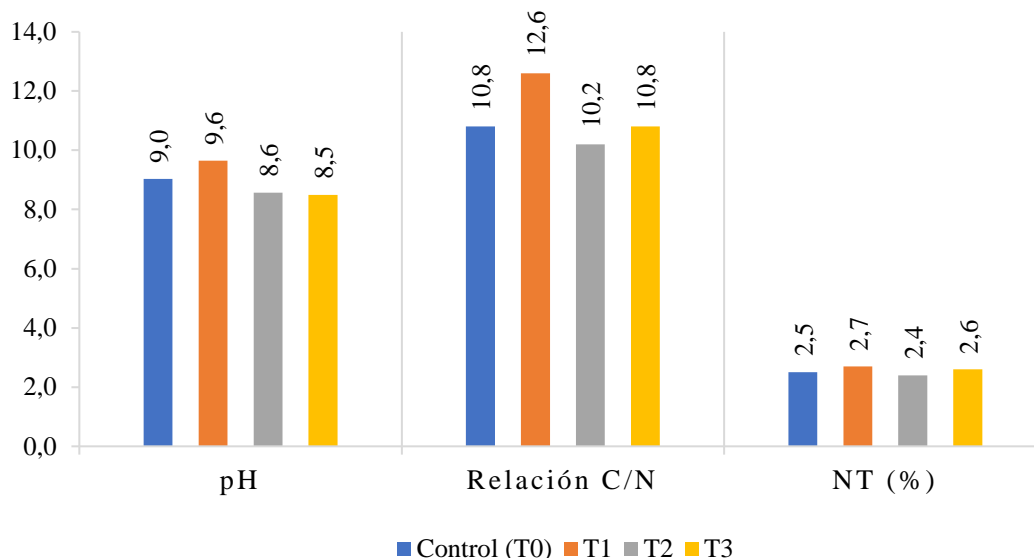
Los resultados de la relación C/N revelan que, en términos generales, los tres tratamientos cumplen con los límites establecidos por la NCh2880 para compost de clase A. Se observa una ligera variación entre ellos, siendo los valores de C/N levemente más bajos en los tratamientos 2 y 3 en comparación con el tratamiento 1 y el control. Este indicador es crucial en la evaluación de la calidad del compost, ya que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y en la estabilidad del material orgánico. Los valores obtenidos sugieren una proporción adecuada entre carbono y nitrógeno para todos los tratamientos, esenciales para garantizar la eficiencia del compostaje y obtener un producto final de calidad (Dume et al., 2023).

En el cálculo de la relación C/N inicial se obtuvo un valor de 35 y los resultados actuales muestran una notable disminución con un rango de 10,0 a 12,6 entre todos los análisis. Esta conducta concuerda con la afirmación de Richard & Trautmann (citado por Mellado, 2023), la cual señala que, durante un proceso adecuado de compostaje, la relación C/N tiende a disminuir gradualmente hasta aproximarse a 10,0. Este descenso se debe a la mineralización del carbono y su liberación como CO₂ gracias a la respiración celular de los microorganismos. Estos resultados subrayan la importancia de una cuidadosa selección y mezcla de materiales para lograr un equilibrio óptimo en el compostaje, contribuyendo así a la obtención de un producto final con una relación entre el carbono y el nitrógeno adecuada y, consecuentemente, de alta calidad.

Según Brust (2019), cuando el compost presenta una relación C/N final en el rango de 1-15, se facilita una rápida mineralización y liberación de nitrógeno, volviendo este elemento disponible para la absorción por las plantas. En este contexto, los valores obtenidos sugieren una composición adecuada para un compost de calidad. A pesar de la alcalinidad evidenciada en el pH (Tabla 11) que teóricamente podría influir en la estabilidad del compost, los resultados de relación C/N y el contenido nutricional de la **Tabla 12** indican que la disponibilidad de nutrientes esenciales no se vio comprometida. En la siguiente gráfica de la **Figura 39**, se muestra un resumen de los promedios de cada tratamiento para el pH, relación C/N y % de nitrógeno total (NT).

Figura 39

*Promedio de los resultados de pH, relación C/N y % de NT de los diferentes tratamientos **



***T1:** RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM. **T2:** RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + Compost maduro. **T3:** RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM + Compost maduro.

El análisis de los resultados de los tratamientos revela diversas características clave, en cuanto al pH, se observa que el T1 con un valor de 9,6 y el T0 con de 9,0 presentan el pH más elevado. Por otro lado, T2 (8,6) y T3 (8,5) mantienen sus valores dentro del rango aceptable. En términos de la relación C/N, T2 destaca al exhibir la relación más baja (10,2), indicando una mayor degradación de materia orgánica y potencialmente una mayor disponibilidad de nutrientes. En contraste, el T1 presenta la relación más alta con 12,6. Al considerar el porcentaje de nitrógeno (NT), T1 lidera con un valor de 2,7 %, seguido de cerca por T3 con 2,6 %. T0 y T2 muestran valores ligeramente más bajos, con 2,5 % y 2,4 %, respectivamente. En términos generales, el tratamiento T2 destaca al mantener un pH aceptable, la relación C/N más baja y un % de NT razonable, posicionándolo como un candidato fuerte entre los tratamientos evaluados.

Con respecto al porcentaje de NT, la norma NCh2880 establece, un requisito mínimo de 0,5 %. En este sentido, los resultados señalan que todos los tratamientos superan ampliamente este valor, fluctuando entre 2,2 % y 3,0 %. Por su parte, aunque la norma no especifica un valor mínimo para el carbono total (CT), los resultados cumplen con lo establecido para la relación C/N, como se observa en la **Tabla 12**. En comparación con el estudio de Young et al., (2020), que también utilizó un 7,5 % de compost maduro inicial como activador biológico en residuos orgánicos

similares, se registra una menor cantidad de CT, pero más del doble de NT para todos los tratamientos que en dicho estudio (38,9 % y 1,07 %, respectivamente).

En el promedio de las réplicas del tratamiento T2, que utilizó únicamente compost como activador, se obtuvieron valores de 24,5 % CT y 2,4 % NT. Al introducir MM en el T3, se observa un aumento en ambos contenidos, alcanzando valores de 28,0 % CT y 2,6 % NT. Sin embargo, el tratamiento más notable fue el T1, activado exclusivamente con MM, que exhibió un importante 34 % CT y 2,7 % NT. Este último superó al control, que registró 27,0 % CT y 2,5 % NT, resaltando especialmente un contenido de CT superior en el T1, a pesar de similitudes en el contenido de NT (ver Tabla 13). Esta variabilidad en los contenidos de carbono y nitrógeno sugiere que la composición específica de los activadores pudo haber influido en la actividad biológica durante el compostaje y, por consiguiente, en los porcentajes finales.

En el caso de los tratamientos con MM, que mostraron un contenido de CT notablemente superior, podría indicar una eficiencia menor en la degradación de compuestos de carbono por parte de los MM utilizados. Aunque ambos estudios compartieron una relación C/N inicial similar (36,8 para Young et al., 2020 y 35,0 para este estudio) y el mismo porcentaje de compost inicial, diferencias en el tiempo total de tratamiento y la composición específica de los materiales pudieron contribuir a las diferencias observadas. Además, la adición de cantidades extra de compost durante los volteos y las condiciones ambientales durante el proceso también podrían haber generado variaciones en la mezcla final e influir en los resultados.

Tabla 13

Resultados nutricionales (NT, CT, P, K) de los diferentes tipos compost obtenidos por tratamiento

Tratamientos¹	**NT (%)	**CT (%)	**P (mg/l)	**K (mg/kg)
Control (T0)	2,5	27	831	140 821 ± 18 434
T1A	2,7	34	1 051	140 821 ± 18 434
T1C	2,7	34	888	170 078 ± 22 263
T2A	2,3	23	1 064	103 499 ± 13 548
T2C	2,5	26	938	80 512 ± 10 539
T3A	2,2	24	969	90 985 ± 11 910
T3C	3,0	32	1 057	94 255 ± 12 338

***Ensayos no acreditados*

¹T1(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM. T2(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + Compost maduro. T3(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM + Compost maduro.

El fósforo (P) es uno de los nutrientes primarios para el desarrollo de las plantas, siendo esencial para la ejecución de procesos metabólicos clave como la fotosíntesis y la respiración (Zhong et al., 2017). Al explorar los distintos tratamientos, se evidencian variaciones en sus concentraciones. El tratamiento T2A alcanzó la concentración más elevada, registrando 1 064 mg/l, seguido por T1A con 1 051 mg/l. En contraste, el control (T0) tuvo la concentración más baja, con un total de 831 mg/l. A pesar de estas fluctuaciones, que podrían indicar diferencias en la disponibilidad de P y, por ende, tener implicaciones en la capacidad del compost para suministrar este nutriente esencial a las plantas, los tratamientos exhibieron comportamientos similares, sin manifestar divergencias significativas. Según Quiñones et al., (2016), los abonos orgánicos deben ser ricos en nutrientes, con concentraciones mayores a 170 mg/l de P, por lo que todos los tratamientos superaron ampliamente este valor.

Por su parte, el potasio (K) es otro de los nutrientes esenciales relacionado en el proceso de fotosíntesis, fortaleciendo la resistencia de las plantas ante condiciones adversas, como sequías y enfermedades (Tavakol et al., 2018). Según la FAO (2013), el compost debe contener entre 3 000 mg/kg y 10 000 mg/kg de K y los resultados de esta investigación revelan concentraciones notoriamente superiores, oscilando entre 80 512 mg/l y 170 078 mg/l. Aunque exceden el límite máximo propuesto por la FAO, es importante destacar que el K raramente causa efectos adversos a concentraciones elevadas. Dada su naturaleza como uno de los macronutrientes clave, junto con nitrógeno (N) y fósforo (P), que abastecen la mayor parte de las necesidades nutricionales de los cultivos, su presencia abundante podría resultar beneficiosa para utilizar el compost como enmienda en suelos agrícolas (Jerez et al., 2019).

Según Castillo (2020), los macroelementos son elementos químicos esenciales para las plantas, requeridos en cantidades significativas para su óptimo desarrollo. Estos desempeñan un papel crucial en la estructura del suelo exigiendo concentraciones a partir de 50 mg/kg para garantizar su adecuado crecimiento. Los resultados de los macroelementos secundarios, como el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), detallados en la **Tabla 14**, revelan que las concentraciones de Ca oscilan entre 95 722 mg/kg y 101 733 mg/kg, siendo el T1A el que exhibe la concentración más baja, mientras que la T1C muestra la más alta. En cuanto al Mg, las concentraciones varían de 11 023 mg/kg a 17 854 mg/kg, siendo el tratamiento T2C el de concentración más baja y el T0 el de concentración más alta.

Estudios anteriores, como el de Rivas y Silva (2020) sobre compostaje de residuos de jardinería, mostró valores de Ca y Mg de 6 877 mg/kg y 6 500 mg/kg, respectivamente. Por otro

lado, el de Apaza et al., (2015), donde se utilizaron activadores biológicos diferentes a los MM y compost maduro, presentaron concentraciones de Ca en un rango de 17 633 mg/kg a 20 017 mg/kg y de Mg entre 4 772 mg/kg y 5 190 mg/kg. En contraste, el estudio de Alcívar (2023), donde sí se emplearon MM como activadores biológicos en residuos agropecuarios, mostraron concentraciones de Ca notoriamente más altas que los anteriores, con un rango de Ca de 41 300 mg/kg a 56 850 mg/kg y una concentración máxima de 11 500 mg/kg de Mg.

Tabla 14

Resultados de micronutrientes en los diferentes tipos de compost

Tratamientos	*Ca (mg/kg)	*Mg (mg/kg)	*Fe (mg/kg)	*Mn (mg/kg)
Control (T0)	95 722 ± 21 423	17 854 ± 3 217	18 594 ± 2 741	304 ± 38
T1A	95 722 ± 21 423	17 854 ± 3 217	10 296 ± 1 518	279 ± 35
T1C	101 733 ± 22 768	17 290 ± 3116	13 528 ± 1 994	301 ± 38
T2A	77 244 ± 17 287	15 150 ± 2 730	39 737 ± 5 857	739 ± 93
T2C	45 741 ± 10 237	11 023 ± 1 986	25 724 ± 3 792	483 ± 61
T3A	50 146 ± 11 223	13 645 ± 2 459	41 144 ± 6 065	629 ± 80
T3C	45 741 ± 10 237	14 770 ± 2 662	35 280 ± 5 200	654 ± 83

**Ensayos acreditados bajo la norma ISO 17025:2017, Alcance LE-024, más información en el sitio web www.eca.or.cr*

¹T1(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM. T2(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + Compost maduro. T3(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM + Compost maduro.

La comparación revela que, las concentraciones obtenidas superan significativamente las reportadas en estas investigaciones previas, que utilizaron residuos orgánicos y activadores biológicos distintos. Este hallazgo sugiere que la composición específica de la mezcla y el tipo de aditivos, como los MM y el compost maduro, podrían haber influido positivamente en la disponibilidad de Ca y Mg en el compost resultante.

Por otro lado, el hierro (Fe) y manganeso (Mn) son clasificados como microelementos, esenciales para una variedad de procesos metabólicos en las plantas, pero requeridos en pequeñas cantidades. Las concentraciones de Fe obtenidas presentan diferencias notables, variando de 10 296 mg/kg a 39 737 mg/kg, donde el tratamiento T2A destaca con la concentración más alta, mientras que T1A registra la más baja. En el caso del Mn, los valores oscilan entre 279 mg/kg y 739 mg/kg, siendo T1A el de la concentración más baja y T2A de la más alta. Al comparar los resultados con estudios previos, como el de Camacho (2019) y el de Castro et al., (2023), que evaluaron diferentes tipos de compost variando los inóculos microbianos, se evidencia una relación en los valores reportados.

El análisis de Camacho (2019), sobre un compost elaborado a partir de residuos de frutas y vegetales como legumbres, hojas de banano, hortalizas y chips de madero negro, con una relación C/N de 30:1 a 35:1, informó una concentración de Fe en el rango de 16 984 mg/kg a 20 772 mg/kg y de Mn de 634 mg/kg a 709 mg/kg, resaltando que el que añadió MM como inóculo microbiano presentó 19 939 mg/kg y 634 mg/kg, respectivamente.

Por otro lado, el estudio de Castro et al., (2023) que probó diferentes inóculos en un compost comercial registró concentraciones de Fe entre 33 399 mg/kg y 51 415 mg/kg, y de Mn entre 796 mg/kg y 1 320 mg/kg, presentando niveles considerablemente más elevados que los de Camacho (2019). A pesar de que el compost elaborado en el presente estudio es de una composición similar al de Camacho, la variedad de residuos orgánicos es más amplia y las concentraciones resultantes se sitúan entre los rangos de ambos estudios, proporcionando perspectivas valiosas sobre la influencia de los inóculos microbianos y los componentes específicos de la mezcla en la composición final del producto.

Diferentes entidades establecen límites máximos permitidos como estándares globales para garantizar la seguridad y eficacia del compost para su uso en la agricultura. En este contexto, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Australia posee ciertos límites de 1 100 mg/kg y 400 mg/kg para elementos como zinc (Zn) y cromo (Cr), respectivamente, al ser considerados tanto microelementos, necesarios solo en pequeñas cantidades, como metales pesados (EPA, 2019).

En comparación, la Norma Chilena NCh2880 y el Decreto 506/2013 de España, impone regulaciones más estrictas para estos elementos. Si bien todos los tratamientos cumplen con los límites establecidos para el Cr en la categoría Clase A, el análisis revela disparidades en cuanto al Zn. Únicamente el T2C y el T0 alcanzan el requisito de 200 mg/kg para ser clasificados como compost de Clase A, mientras que los demás presentan concentraciones en el rango de 225 mg/kg a 341 mg/kg, siendo el T3A el que exhibe la concentración más elevada (Tabla 15).

Tabla 15

Resultados de metales pesados en los diferentes tipos de compost y comparación con los límites de la NCh2880

Tratamientos		*Cr (mg/kg)	*Zn (mg/kg)
Control (T0)		33,1 ± 4,1	192 ± 21
T1A		18,9 ± 2,3	225 ± 25
T1C		28,6 ± 3,5	286 ± 32
T2A		44,5 ± 5,5	297 ± 33
T2C		27,0 ± 3,3	162 ± 18
T3A		30,7 ± 3,8	341 ± 38
T3C		34,0 ± 4,2	293 ± 32
Norma	Clase A	120	200
NCh2880	Clase B	600	2 000
Decreto	Clase A	70	200
506/2013	Clase B	250	500
EPA (2006)	-	400	1 100

**Ensayos acreditados bajo la norma ISO 17025:2017, Alcance LE-024, más información en el sitio web www.eca.or.cr*

¹T1(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM. T2(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + Compost maduro. T3(A y C): RO residenciales y comerciales + Burucha de madera + MM + Compost maduro.

El elevado contenido de Zn en algunas pruebas podría atribuirse a diversas causas, como la presencia de materiales iniciales contaminados, la introducción de aditivos o activadores ricos en Zn y contaminación o condiciones inadecuadas en el proceso de compostaje, contribuyendo al aumento de los niveles en el producto final. Las consecuencias de tales concentraciones elevadas en los suelos incluyen la posibilidad de toxicidad para las plantas, impactos ambientales negativos y problemas a largo plazo para la salud del suelo y la productividad agrícola. Sin embargo, aunque la mayoría de los tratamientos incumplen con los límites para ser clasificados como Clase A, todos presentan concentraciones por debajo de 350 mg/kg, por lo que pueden clasificarse como Clase B y no representarían un riesgo ambiental significativo para la salud humana.

Al comparar los resultados de Zn obtenidos con los datos proporcionados por González et al., (2021), para un compost de tipo comercial, se aprecia una notable similitud entre los valores. Mientras que los análisis de laboratorio revelaron concentraciones de Zn en el rango de 162 a 341 mg/kg, el compost comercial de González et al., (2021) presenta una concentración de 300 mg/kg. Esta consistencia en los niveles de Zn sugiere que el compost obtenido puede ser comparable con un producto comercial y se destaca que incluso un producto de este tipo puede superar el límite establecido para ser considerado de Clase A (200 mg/kg).

5.2.2.2 Viabilidad de implementación

El tratamiento T2C, se destaca como la opción más sobresaliente al analizar en detalle los nutrientes y parámetros cruciales para la calidad del compost. Aunque su pH de 8,63 no cumplió con el límite establecido por la NCh2880 (8,5), permanece dentro del rango aceptable (Tabla 12), presentando condiciones ligeramente alcalinas que son consideradas aptas para el crecimiento de diversos cultivos. En cuanto a la relación C/N, presentó una cifra de 10,4 que indica una buena disponibilidad de nitrógeno para las plantas. A su vez, si bien no tuvo las concentraciones más altas de P y K, sus niveles son significativos y junto con otros factores analizados se respalda su elección como un tratamiento destacado. La calidad del compost, no solo se determina por concentraciones individuales, sino por el equilibrio general de nutrientes y propiedades del suelo que ofrece.

En lo que respecta a elementos específicos, T2C se distingue por mantener concentraciones moderadas y equilibradas de elementos esenciales como Mg, Fe y Mn. Si bien no destaca por las concentraciones más elevadas, se encuentran en niveles adecuados, proporcionando macro y micronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, pero evitando extremos que podrían causar problemas de toxicidad o deficiencia. Además, su concentración de metales pesados como Cr y Zn se mantiene dentro de los límites establecidos por la normativa NCh2880, garantizando la seguridad ambiental del compost. En conjunto, estos resultados respaldan la elección de T2C como un tratamiento destacado para obtener un producto final con un equilibrio óptimo de pH, relación C/N y concentraciones de nutrientes esenciales.

A continuación, se presenta el análisis y cálculos para evaluar la viabilidad del proyecto, iniciando con la consideración de los costos de implementación, que abarcan materiales equipos e insumos necesarios. Luego, se detallan los costos operativos de recolección, los recursos humanos y el combustible para el funcionamiento diario. Este análisis se complementa con el cálculo de los ingresos potenciales derivados de la venta del compost, lo que nos permite evaluar la rentabilidad del proyecto en el corto plazo. La comparación exhaustiva entre los costos y los ingresos constituirá un factor determinante para establecer la viabilidad financiera de la propuesta.

6.2.2.1 Evaluación de costos e ingresos potenciales por la implementación del proyecto

A continuación, los costos del proyecto se dividen en dos categorías. La primera comprende los costos de implementación, los cuales incluyen la adquisición de equipos y materiales (ver Tabla 16) e insumos (ver Tabla 17). La segunda categoría aborda los costos operativos, que se refieren a

la recolección (Tabla 18), el consumo de combustible (Tabla 19) y los costos asociados al personal (Tablas 20 y 21).

1) Costos de implementación: Equipos, materiales e insumos.

En cuanto a los materiales y equipos necesarios para la implementación del proyecto (ver Tabla 5), cabe destacar que la municipalidad ya cuenta con la mayoría de estos recursos, debido a que son indispensables para las operaciones cotidianas en el Plantel Municipal. Por lo tanto, al calcular los costos del proyecto, únicamente se incluyen aquellos adicionales que la municipalidad debe adquirir específicamente para la ejecución del proyecto, detallados a continuación:

Tabla 16

Costos de implementación: Equipos y materiales

Materiales de apoyo	Costos	Detalle
1 bitácora	₡ 1 575	El Rey Guápiles
1 pichinga	₡ 6 150	Colono Agropecuario
Total	₡ 7 725,00	-
Equipos de medición	Costos	Detalle
1 termómetro de suelo	₡ 13 128	Locomondo (consultar Tabla 25)
Higrómetro pH-metro	₡ 10 791	Tiendamia (Consultar Tabla 25)
Máquina trituradora	₡ 2 989 212	Vedova y Obando (Consultar Figura 43)
Trommel de tamizado	₡ 6 678 000	Ficmams (Consultar Figura 44)
Máquina volteadora	₡ 12 000 000 - ₡ 18 000 000 Promedio: ₡ 15 000 000	Ficmams (Consultar Figura 45)
Total	₡ 24 706 581,00	-

Tabla 17

Costos mensuales en insumos para la formación de las hileras

Insumos para las hileras	Costos	Detalle
Compost maduro (130 sacos de 25 kg c/u, ₡ 4 242 c/u)	₡ 551 460	(Consultar Tabla 22) Colono Agropecuario
Melaza 1 pichinga (20 l)	₡ 6,950	Colono Agropecuario
Total	₡ 558 410,00	-

Cabe destacar que, en relación con los insumos necesarios para la formación de las hileras, solo se contemplaron los mencionados, debido a que la burucha de madera es donada y los MM adquiridos para las pruebas han sido descartados de la propuesta, debido a que en los resultados obtenidos estos no mostraron una alta efectividad. No obstante, se sugiere evaluar otras alternativas de MM que demuestren una mayor eficiencia en el proceso. Además, si bien la municipalidad ya cuenta con un termómetro y un medidor de pH, se recomienda la adquisición de equipos con proporciones adecuadas que faciliten las mediciones directas en campo, considerando el tamaño de las hileras. Existen opciones como las sugeridas en la **Tabla 27**, que incluye tanto un termómetro como medidor de pH con un higrómetro de espigas largas que facilitas las mediciones.

2) Costos operativos: Recolección, recursos humanos y combustible.

Los costos operativos se calcularon anualmente, a su vez, es importante señalar que los costos relacionados con el personal, detallados en las **Tablas 20 y 21**, fueron calculados de manera independiente. Esta distinción se debe a que, en la municipalidad, los salarios varían para estos dos tipos de puestos. La información empleada para estimar estos costos se obtuvo del **Anexo 13**, suministrada por la Municipalidad de Pococí, que presenta los datos de manera individualizada.

Tabla 18

Costos del servicio de recolección por camión

Cantidades	Costos	Detalle
Horas camión/día	5	Promedio obtenido de la base de datos municipal de la ruta de recolección propuesta para el proyecto.
Precio hora/camión	₡ 25 000,00	Costos por el alquiler del camión por hora. Dato tomado de la base de datos municipal (ver Anexo 13).
Costo total día	₡ 125 000,00	Precio por hora x cantidad de horas (5)
Costo semanal	₡ 375 000,00	Costo diario x cantidad de días de recolección (tres).
Costo mensual	₡ 1 500 000,00	Costo semanal x cantidad de semanas (cuatro).
Pólizas	₡ 4 223 074,00	Dato tomado de la base de datos municipal (ver Anexo 13).
Costo anual	₡ 22 223 074,00	Costo mensual x cantidad de meses (doce).

Tabla 19*Costos de combustible para la recolección de residuos orgánicos*

Cantidades	Costos	Detalle
Litros diésel por día (l/día)	182,93	Promedio anual del consumo de combustible diario de los camiones del servicio de recolección para la ruta definida para el proyecto. Obtenido de la base de datos municipal (ver Anexo 14).
Costo litro diésel	₡ 691,00	Datos oficiales de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), 13 de diciembre de 2023.
Costo diario diésel	₡ 126 404,63	Cantidad de litros x costo por litro.
Costo semanal diésel	₡ 379 213,89	Costo diario x cantidad de días de recolección (tres).
Costo mensual diésel	₡ 1 516 855,56	Costo semanal x cantidad de semanas (cuatro).
Costo anual diésel	₡ 18 202 266,72	Costo mensual x cantidad de meses (doce).

Tabla 20*Costos de recurso humano para el personal de recolección y del proceso operativo*

Cantidades	Costos	Detalle
Cantidad de trabajadores	5	Estimado en el apartado “6.2.2.1 Recurso humano”.
Horas por turno	5	Jornada laboral de un trabajador ocasional en la Municipalidad de Pococí.
Días de trabajo	6	Jornada laboral de un trabajador ocasional en la Municipalidad de Pococí. Se puede ajustar el horario a 5 días, más horas por semana según las necesidades.
Costo mensual / peón + CCSS	₡ 518 780,52	Definido por el departamento de Recursos Humanos de la Municipalidad de Pococí.
Costo diario por trabajador	₡ 21 615,86	Definido por el departamento de Recursos Humanos de la Municipalidad de Pococí. Salario bruto / cantidad de días al mes (24).
Costo semanal por trabajador	₡ 129 695,16	Costo diario por trabajador x cantidad de días (seis).
Costo semanal total	₡ 648 475,80	Costo semanal por trabajador x cantidad de trabajadores.
Costo mensual total	₡ 2 593 903,20	Costo semanal total x cantidad de semanas (4).
Costo anual peones	₡ 31 126 838,40	Costo mensual total x cantidad de meses.

Tabla 21*Costos de recurso humano para el personal operador del camión recolector*

Cantidades	Costos	Detalle
Cantidad de trabajadores	1	Estimado en el apartado “6.2.2.1 Recurso humano”.
Horas por turno	5	Jornada laboral de un trabajador ocasional en la Municipalidad de Pococí.
Días de trabajo	3	Jornada laboral de un trabajador ocasional en la Municipalidad de Pococí. Se puede ajustar el horario a 5 días, más horas por semana según las necesidades.
Costo diario	₡ 33 909,22	Definido por el departamento de Recursos Humanos de la Municipalidad de Pococí.
Costo semanal	₡ 101 727,66	Costo diario x cantidad de días de recolección (tres).
Costo mensual total	₡ 406 910,64	Costo semanal x cantidad de semanas (4).
Costo anual conductor	₡ 4 882 927,68	Costo mensual x cantidad de meses.

3) Ingresos potenciales por la venta de compost

Dado que la cantidad estimada de residuos orgánicos por tratar es de 4,12 toneladas por día de recolección (consultar la Tabla 24) y se propone realizarla 3 días a la semana, la cantidad total generada semanalmente sería de 12,36 ton/semana. Sin embargo, es necesario considerar que durante el proceso de compostaje el tamaño de las hileras disminuye hasta un 50 % por la compactación, degradación y pérdida de carbono en forma de CO₂ (Ministerio de Ambiente y Agua, 2020). Además, según la FAO (2013), la densidad inicial aproximada de 150 kg/m³ - 250 kg/m³ pero conforme avanza el proceso, el tamaño disminuye y como resultado la densidad aumenta a un rango de 600 kg/m³ - 700 kg/m³.

Si se asume una reducción del 50 % en el volumen durante el proceso de compostaje. Entonces, tendríamos una cantidad de compost final de: 12.36 ton/semana x 0,5 = 6,18 ton/semana.

Luego, considerando la densidad final establecida por la FAO (2013), se asume el valor medio de este rango, esta de 650 kg/m³.

Ecuación 4

$$\text{Volumen final (m}^3\text{)} = \frac{\text{Cantidad de compost generada (kg)}}{\text{Densidad final (kg/m}^3\text{)}}$$

$$\text{Volumen final (m}^3\text{)} = \frac{6,18 \frac{\text{ton}}{\text{sem}} \times 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}}{650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 9,50 \text{ m}^3 / \text{ semana}$$

Finalmente, para calcular los ingresos por la venta del compost, se considera la cantidad generada por semana y mes, así como las opciones de presentación (sacos de diferentes tamaños) y sus respectivos precios. Utilizando la información brindada por las municipalidades con proyectos de compostaje, se determinó que el rango de precios debe ser competitivo con un aproximado de 100 colones por kilogramo, variando en el rango de 1 500 a 2 500 colones por saco de 25 kg, dependiendo del cribado y presentación (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022). En este sentido, se sugiere comercializar el saco sin cribar a un precio inicial de 2 000 colones y el cribado a 2 500 colones, así como una opción a granel en caso de demanda.

- Saco de 25 kg sin cribar: 2 000 colones/saco.
- Saco de 25 kg cribado: 2 500 colones/saco.
- Presentación a granel: 100 colones/kg.

Considerando la información anterior, se estiman los ingresos por la venta de compost según la presentación, sugiriendo un 40 % para cada tipo en sacos de 25 kg y el 20 % adicional para granel.

a) Saco de 25 kg sin cribar (precio: 2 000 colones/saco): 40 %

- Cantidad mensual: $6,18 \text{ ton/semana} \times 4 \text{ semanas/mes} \times 0,40 = 9,9 \text{ ton/mes} = 9\,888 \text{ kg/mes}$.
- Ingresos mensuales: $\frac{9\,888 \frac{\text{kg}}{\text{mes}}}{25 \frac{\text{kg}}{\text{saco}}} = 395,52 \frac{\text{sacos}}{\text{mes}} \times 2\,000 \frac{\text{colones}}{\text{saco}} = 791\,040 \frac{\text{colones}}{\text{mes}}$

b) Saco de 25 kg cribado (precio: 2 500 colones/saco): 40%

- Cantidad mensual: $6,18 \text{ ton/semana} \times 4 \text{ semanas/mes} \times 0,40 = 9,9 \text{ ton/mes} = 9\,888 \text{ kg/mes}$.
- Ingresos mensuales: $\frac{9\,888 \frac{\text{kg}}{\text{mes}}}{25 \frac{\text{kg}}{\text{saco}}} \times 2\,500 \frac{\text{colones}}{\text{saco}} = 988\,800 \frac{\text{colones}}{\text{mes}}$

c) Presentación a granel (precio: 100 colones/kg): 20%

- Cantidad mensual: $6,18 \text{ ton/semana} \times 4 \text{ semanas/mes} \times 0,20 = 4,9 \text{ ton/mes} = 4\,944 \text{ kg/mes}$.

- Ingresos mensuales: $4\,944 \frac{kg}{mes} \times 100 \frac{colones}{kg} = 494\,400 \frac{colones}{mes}$

d) Ingresos potenciales totales

Total: $\text{C} 791\,040 + \text{C} 988\,800 + \text{C} 494\,400 = \text{C} 2\,274\,240$ mensuales $\times 12 = \text{C} 27\,290\,880$ anuales.

4) Estimación de ahorro por no enviar al relleno sanitario

Para calcular las ganancias anuales derivadas de la decisión de no enviar los RO al relleno sanitario, es necesario realizar una serie de pasos que consideren tanto el costo de tratamiento como el porcentaje de comercios que no utilizan este servicio.

En primer lugar, se estima el costo total mensual por enviar la cantidad estimada de 42 ton de RO al relleno sanitario. El costo por ton de residuos es de $\text{C} 17\,500$, lo que resulta en un total mensual de $\text{C} 735\,000$. Posteriormente, este valor mensual se multiplica por 12 para obtener el costo anual por enviar RO al relleno sanitario. Así, el costo anual se calcula como:

- Costo anual de tratamiento: $\text{C} 735\,000 * 12 = \text{C} 8\,820\,000$.

Sin embargo, dado que el 75 % de los comercios de la muestra no envían sus RO al relleno sanitario (ver Figura 26), es necesario ajustar este cálculo para reflejar esta realidad. Por lo tanto, solo se considera el 25 % restante de los comercios, lo que implica que el 75 % del costo anual estimado debe ser descontado. Finalmente, al aplicar esta resta, se obtiene el ingreso anual por no enviar al relleno sanitario los RO es de $\text{C} 2\,205\,000$.

Cabe destacar que la cantidad de 42 ton se deriva del cálculo estimado para la capacidad de tratamiento de la planta, de acuerdo con los resultados de generación del objetivo 1. Este ajuste revela una ganancia anual por debajo de las expectativas, totalizando $\text{C} 2\,205\,000$. Este resultado subraya la importancia de considerar el porcentaje de comercios que no utilizan el servicio de envío al relleno sanitario al estimar las ganancias potenciales de esta acción.

A pesar de que únicamente se calcularon las ganancias del 25 % que actualmente envía sus RO al relleno sanitario, la municipalidad conserva la facultad de imponer la obligatoriedad de entregar sus RO a todos los comercios. Esto se fundamenta en la necesidad de regular y controlar las actividades actuales de disposición, especialmente en lo que respecta a su uso como alimento para animales. Sin embargo, la viabilidad y conveniencia de esta acción debe evaluarse

cuidadosamente, considerando factores como la infraestructura disponible, las prácticas de gestión de residuos existentes y la capacidad financiera tanto de los comercios como de la municipalidad. Es fundamental ponderar no solo las posibles ganancias económicas de no enviar los residuos al relleno sanitario, sino también las implicaciones regulatorias y operativas, así como la capacidad del distrito para adaptarse y beneficiarse de esta nueva estrategia de gestión de residuos.

5) Rentabilidad: Comparación de costos e ingresos

La **Tabla 22** proporciona un resumen de los costos e ingresos calculados previamente, así como la diferencia entre ambos para evaluar la viabilidad económica del proyecto. Los costos se calcularon anualmente, con la excepción de los equipos y materiales, que se adquieren únicamente al inicio del proyecto, y los insumos. El principal costo de los insumos es el compost maduro; sin embargo, después del primer mes de operación, es posible utilizar el producido por el proyecto, eliminando la necesidad de comprarlo.

Tabla 22

Comparación entre costos e ingresos

Tipo de costo	Costos totales
Implementación: Equipos y materiales	₡ 24 714 306
Insumos para la formación de las hileras	₡ 558 410
Servicio de recolección	₡ 22 223 074,00
Consumo de combustible para la recolección de residuos	₡ 18 202 266,72
Recurso humano para la recolección y el proceso operativo	₡ 31 126 838,40
Recurso humano para el operador del camión recolector	₡ 4 882 927,68
Costos totales	- ₡ 101 707 822,80
Ingresos por ventas del compost	+ ₡ 27 290 880,00 anuales
Ahorro en relleno sanitario	+ ₡ 2 205 000,00 anuales
Diferencia (Costos-Ingresos)	- ₡ 72 211 942,80 anuales

Es importante señalar que en la categoría de equipos se incluyó la adquisición del volteador de compost. Sin embargo, en la propuesta se contempla inicialmente un proceso de volteo manual debido al elevado costo de inversión asociado al equipo. A pesar de esto, al mantener únicamente los costos e ingresos anuales y omitir la inversión inicial en equipos, materiales e insumos, la diferencia entre costos e ingresos resultaría en - ₡ 46 939 226,8 anuales, lo que indica que desde el punto de vista económico en el corto plazo el proyecto no resulta viable. A esto se le suma que los costos de infraestructura no fueron incluidos dentro de los cálculos.

No obstante, el interés de implementación desde la Municipalidad de Pococí, no solo se orienta hacia la rentabilidad económica, sino que responde a la necesidad de cumplir con obligaciones legales y mitigar los impactos ambientales. Aunque el proyecto al iniciar puede no ser financieramente rentable para el corto plazo, ofrece beneficios ambientales y sociales como la reducción de emisiones de GEI, la disminución de residuos enviados al relleno sanitario y la creación de empleo local, aspectos que contribuyen a la sostenibilidad ambiental y al bienestar comunitario. Aun así, es recomendable realizar proyecciones económicas a medio y largo plazo para evaluar de manera más exhaustiva la viabilidad de su implementación.

Al evaluar la viabilidad se debe contemplar también el factor social, donde a través de las encuestas se determina que la disposición de la población fue positiva sobre la participación en el proyecto en caso de implementarse, tanto en el ámbito residencial (85 %) como comercial (61 %), lo que indica el potencial éxito del proyecto. Sin embargo, es esencial abordar las reticencias específicas del sector comercial, quienes ya cuentan en su mayoría (75 %) con un método de disposición. A pesar de los desafíos identificados, existe una base sólida para la implementación del proyecto de compostaje centralizado en el distrito de Guápiles. La regulación adecuada, la adaptación a las particularidades del sector comercial y la capacitación específica se presentan como aspectos clave para garantizar el éxito y sostenibilidad del proyecto.

5.3 Propuesta de compostaje municipal con enfoque en economía circular

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de compostaje, realizadas como parte del objetivo 2 de esta investigación, se ha llevado a cabo una evaluación de las tres variantes estudiadas y se seleccionó el método que demostró mejor rendimiento en términos fisicoquímicas, tales como la temperatura, pH, color, textura, nutrientes, entre otros. Asimismo, se ha analizado su viabilidad de implementación en el corto plazo según los costos e información de las encuestas y se han identificado las modificaciones necesarias para su aplicación efectiva en el marco de esta propuesta.

El propósito fundamental del proyecto es mitigar la disposición de residuos orgánicos, que constituyen el 58,1 % del total, en rellenos sanitarios, optando en su lugar por un enfoque de economía circular basado en la creación de una planta de compostaje centralizado para el sector comercial principalmente, complementado con el enfoque descentralizado para el residencial, bajo la gestión y supervisión de la Municipalidad de Pococí. Aunque la propuesta a corto plazo prioriza la combinación de estrategias, con un enfoque centralizado dirigido al sector comercial debido a los intereses municipales al ser los mayores generadores, se sugiere la incorporación gradual de

puntos estratégicos residenciales a mediano y largo plazo, junto a las iniciativas descentralizadas como composteras rotativas y métodos alternativos artesanales.

5.3.1 Primer apartado: Preparación y planificación

5.3.1.1 Descripción del proyecto

La propuesta de compostaje centralizado se basa en el tratamiento mediante el compostaje de pilas, empleando compost maduro como activador biológico, lo cual se aborda con mayor detalle en la sección de aspectos técnicos de operación. Para llevar a cabo esta iniciativa, se consideran los recursos ya disponibles por el gobierno local. Teniendo en cuenta la disponibilidad de espacio y los intereses municipales, se ha definido una capacidad máxima de procesamiento en la que se prioriza la participación del sector comercial, dada su gran contribución sobre la generación de este tipo de residuos. Esto se alinea con los objetivos de la municipalidad y se integra dentro del marco del Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos, donde ya se aborda el compostaje descentralizado como una solución para el sector residencial.

En el ámbito residencial, la propuesta se centra en la implementación de un sistema descentralizado, aprovechando la participación de los habitantes del distrito de Guápiles. Se propone el fortalecimiento del programa Pococí Composta, fomentando el uso de tómbolas y métodos alternativos para la gestión eficiente de los residuos orgánicos a nivel doméstico. Este enfoque no solo busca reducir la carga de residuos en el sistema central, disminuyendo así la necesidad de transporte y procesamiento a gran escala, sino que también fomenta la participación comunitaria en prácticas sostenibles. La implementación de métodos sencillos y accesibles permite a los residentes contribuir de manera activa al ciclo de la economía circular, generando compost valioso para mejorar la calidad del suelo local y reduciendo la huella ambiental asociada con la gestión de residuos orgánicos.

Según Mercado y Rivera (2021), los tres principios fundamentales de la economía circular son: 1) Eliminar los residuos y la contaminación desde el diseño, 2) Mantener productos y materiales en uso, y 3) Regenerar los sistemas naturales. Este proyecto se alinea con estos principios al diseñar un sistema de compostaje que, aunque no elimina la generación de residuos, busca reducir la contaminación mediante su tratamiento adecuado. A su vez, los residuos orgánicos se transforman en compost, promoviendo su reutilización. Por último, se contribuye a la regeneración de los sistemas naturales al devolver nutrientes al suelo, mejorando su calidad y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos. La implementación de métodos centralizados y

descentralizados de compostaje optimiza el uso de los recursos e involucra a la comunidad en prácticas sostenibles, incentivando una economía circular en el distrito de Guápiles.

5.3.1.2 Disponibilidad del residuo orgánico

La evaluación de la disponibilidad de residuos orgánicos es esencial para diseñar un sistema de compostaje eficiente. Conocer la cantidad y tipo de residuos generados permite dimensionar adecuadamente la capacidad de tratamiento y asegurar la sostenibilidad del proyecto. En el contexto de economía circular, esta evaluación asegura que los recursos orgánicos disponibles en el territorio se aprovechen al máximo y reduce el impacto ambiental asociado con la eliminación de residuos.

El tipo de residuos orgánicos disponibles son principalmente residuos de frutas y verduras, restos de alimentos cocinados y cáscaras de huevo, según lo indican los resultados obtenidos sobre la generación en el sector comercial (consultar Figura 25). La principal fuente de estos residuos proviene de los establecimientos comerciales ubicados en el área céntrica del distrito de Guápiles, de acuerdo con la solicitud de la municipalidad. Esto se debe a la alta concentración de comercios en la zona y al significativo porcentaje de generación que representan. También se contempla la inclusión de residuos de jardín, como zacate y ramas del mantenimiento de parques, así como burucha de madera generada en aserraderos de la zona y si se desea, pequeñas cantidades de residuos cárnicos y huesos cocinados.

En cuanto a la disponibilidad del material orgánico, según el estudio de generación de RO municipales realizado en 2022, la muestra de 47 comercios dio un total de 5 686,8 ton generadas durante la semana de estudio, con un promedio diario de 1 197,7 ton. Estos resultados nos permitieron estimar de manera aproximada la cantidad de residuos a tratar de la población objeto, que comprende los principales comercios generadores identificados en función de su actividad, los cuales incluyen verdulerías y fruterías, establecimientos de comida rápida para llevar, pizzerías, restaurantes, sodas, carnicerías, cantinas o bares, panaderías y supermercados.

En primer lugar, se definió la cobertura del servicio usando como referencia la ruta de recolección municipal de residuos ordinarios, ya que abarca el área con la mayor concentración de comercios en el cantón. Una vez que se determinó la ruta de recolección que sería cubierta, se empleó la base de datos municipal que contiene información sobre las patentes comerciales del cantón. A través de un proceso de filtrado, se identificaron los tipos de comercios mencionados anteriormente y los sectores que forman parte de la ruta, los cuales incluyen: Guápiles Centro,

Aeropuerto, Barrio Diamantes, Cementerio Guápiles, El Cuadrante, la zona del Cementerio y el Hospital. Al realizar este filtro, se contabiliza un total de 136 comercios en estas áreas y luego se extrapoló el valor obtenido de la muestra al número total de comercios en la población meta.

Ecuación 5

$$\text{Cantidad de RO} = \frac{136 \text{ comercios} * 1\,197,7 \text{ kg}}{47 \text{ comercios}} = 3\,465,7 \text{ kg} \approx 3,5 \text{ ton diarias}$$

Al calcular la cantidad de residuos a tratar, es crucial considerar tanto el tamaño actual como las expectativas de crecimiento de la población (CEGESTI, 2021). No obstante, basándonos en las estadísticas económicas recopiladas por el INEC en la última década, se ha observado una reducción del 35 % en la densidad comercial 2012-2022, con un promedio anual de decrecimiento del 3 %. La **Tabla 23**, presenta los valores anuales correspondientes y la **Figura 40**, ilustra este comportamiento. Por lo tanto, tomando en cuenta estos datos se establece como cantidad máxima inicial el valor previamente calculado, redondeándola a un total de 3,5 ton diarias.

Tabla 23

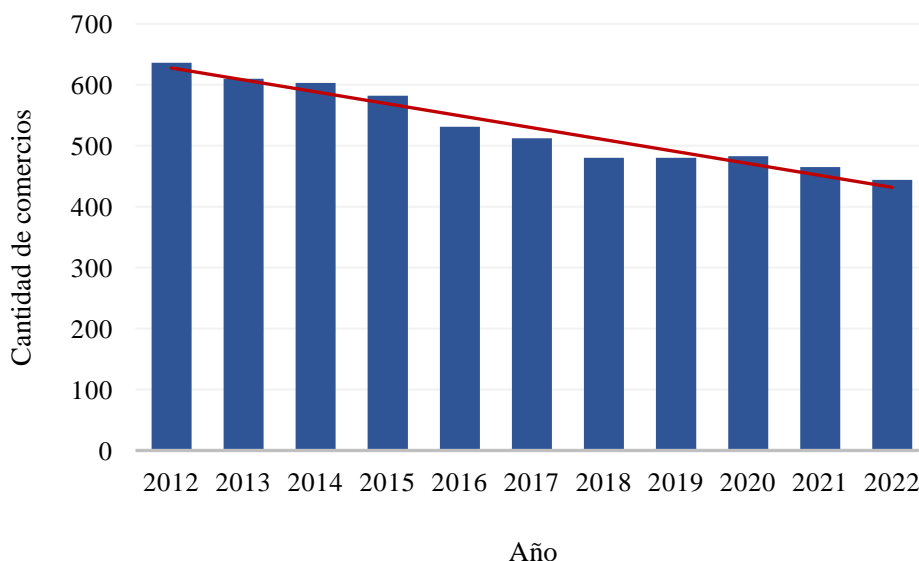
Cantidades anuales de comercios en el distrito de Guápiles

Año	Cantidad de comercios	Disminución (%)
2012	636	-
2013	610	-4 %
2014	603	-1 %
2015	582	-3 %
2016	531	-9 %
2017	512	-4 %
2018	480	-6 %
2019	480	0 %
2020	483	1 %
2021	465	-4 %
2022	444	-5 %
Total		-35 %
Promedio		-3 %

Nota. La disminución porcentual se calculó utilizando los datos recopilados por INEC en diferentes archivos por año de Microsoft Excel. Tomado de *base de datos del INEC sobre Estadísticas Económicas de Total de empresas según Provincia, Cantón y Distrito, 2012-2022*.

Figura 40

Comportamiento de la densidad comercial en el distrito de Guápiles del año 2012 al 2022



Nota. Adaptado de *base de datos del INEC sobre Estadísticas Económicas de Total de empresas según Provincia, Cantón y Distrito, 2012-2022*, Microsoft Excel.

Por lo tanto, tomando como referencia los datos del INEC, no se considera necesario proyectar un aumento en la generación de residuos en los próximos años, ya que los números indican un declive gradual en la cantidad de comercios en la zona. Además, se debe considerar que el 68 % de los comercios muestreados en el estudio separa los RO, principalmente para uso como alimento para animales, ya sean propios o de terceros. Esto significa que existe una posibilidad de que, a pesar de tener acceso al servicio de recolección municipal, un porcentaje importante decida no entregar sus residuos al camión recolector. En el escenario en el que el porcentaje de recolección sea inferior a la capacidad de la planta establecida para 3,5 toneladas diarias, se propone la inclusión de barrios céntricos del distrito, donde la falta de espacio limite su aprovechamiento mediante métodos alternativos.

5.3.1.3 Análisis legal

Al desarrollar un proyecto de compostaje y promover prácticas de economía circular, es fundamental considerar tanto la normativa ambiental como las regulaciones locales. El artículo 3 del Decreto N° 43898-MINAE-S-MOPT-MAG-MEIC: Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental, especifica las actividades, obras o proyectos que por su naturaleza no requieren Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) ante la Secretaría Técnica Nacional

(SETENA). Teniendo en cuenta que el área de la planta de compostaje no superará los 1 000 m², no hará movimientos de tierra mayores a 999 m³, no se desarrollará en un área ambientalmente frágil, ni manipulará, almacenará o transportará productos peligrosos, el proyecto se puede considerar de muy bajo impacto ambiental, excluyéndolo de la Evaluación de Impacto Ambiental.

El reglamento no menciona específicamente a las plantas de compostaje, pero incluye en el “Anexo 2: Actividades de muy bajo impacto” a los centros de recuperación de residuos valorizables. Si bien una planta de procesamiento de residuos orgánicos no se asemeja a un centro de acopio tradicional, comparte similitudes en cuanto a su infraestructura y las actividades de recuperación y valorización de residuos, lo que respalda la clasificación del proyecto como de “muy bajo impacto ambiental”. Sin embargo, a pesar de no requerir la tramitación de una EIA ante la SETENA, el proyecto seguirá estando sujeto a controles ambientales por parte de las entidades competentes y se registrará por las disposiciones establecidas en el Código de Buenas Prácticas Ambientales del Decreto Ejecutivo N° 32079.

La legislación en el tema de residuos es amplia y puede consultarse en el apartado “4.1 Normativa costarricense sobre residuos sólidos”. Sin embargo, al considerar la normativa con mayor relación al proyecto, se debe mencionar la Ley N° 8839: Ley para la Gestión Integral de Residuos, ya que en el artículo 8 dicta las funciones de las municipalidades en su cantón sobre este tema. Esta ley establece como requisito institucional, elaborar y aplicar el Plan Municipal de Gestión de Residuos Sólidos, el cual se encuentra actualizado en la Municipalidad de Pococí para el periodo 2023-2028 y la ejecución de un proyecto de compostaje alineado con la economía circular puede contribuir a las metas de este plan al promover la valorización de residuos orgánicos y reducir el volumen de desechos enviados al relleno sanitario.

Además, el proyecto se alinea de manera coherente con la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), el Plan Nacional de Descarbonización (PND), el Programa País de Carbono Neutralidad 2.0 y el I Plan Nacional de Compostaje 2020-2050, ya que estos enfatizan la gestión de residuos como un elemento fundamental para el logro de los objetivos ambientales y reconocen a las municipalidades como agentes clave en su implementación.

En caso de implementarse el proyecto, se debe revisar y actualizar el Reglamento para la Gestión Integral de Residuos Sólidos de la Municipalidad de Pococí para incorporar las directrices específicas, fomentar la separación y recolección de residuos orgánicos, y promover la participación de los comercios. Alternativamente, la emisión de un nuevo reglamento podría proporcionar un marco normativo más completo que respalde la implementación de prácticas de

economía circular y garantice su integración en el sistema de gestión de residuos. El Código Municipal (Ley N° 7794) respalda en su artículo 4 la autonomía política, administrativa y financiera que le confiere la Constitución Política a las municipalidades para dictar reglamentos relacionados con la organización y prestación de servicios públicos (Asamblea Legislativa, 1998).

Por otra parte, con respecto a la construcción y operación del proyecto se deben considerar las solicitudes del Permiso de Uso de Suelo y el Permiso de Construcción, acorde a los requisitos establecidos por la Municipalidad de Pococí, así como el Permiso Sanitario de Funcionamiento del Decreto Ejecutivo N° 43432. Este último menciona en la Tabla 1 del Anexo 1 la “Clasificación de actividades comerciales, industriales y de servicios reguladas por el Ministerio de Salud según nivel de riesgo sanitario y ambiental”, la cual establece en la Sección E, “la recolección, tratamiento y eliminación de desechos y recuperación de materiales”, categorizada en el Grupo A (Riesgo alto), para lo cual se debe realizar el trámite de la solicitud por un monto de US\$ 100,00.

Finalmente, al tratarse de un proyecto de recuperación de residuos, la planta debe ajustarse a lo indicado en el Decreto Ejecutivo N° 35906-S: Reglamento de centros de recuperación de residuos valorizables, el cual respalda como requisito básico la solicitud y actualización del permiso sanitario de funcionamiento.

5.3.2 Segundo apartado: Diseño de planta

5.3.2.1 Localización

La ubicación de la planta de compostaje es un factor importante para la eficiencia operativa y económica del proyecto. Para minimizar los costos de transporte, es esencial que tanto la materia orgánica de entrada como la demanda del producto final se encuentren en un área cercana (Zink, 2022). En este contexto, se ha establecido un rango geográfico específico para la ubicación de la planta de compostaje, que abarca exclusivamente el distrito de Guápiles, en el cantón de Pococí. Esta elección se justifica por varias razones fundamentales. En primer lugar, Guápiles es el centro del desarrollo comercial en la región y también la población objetivo de la municipalidad para la recolección y tratamiento.

Además, los productores agrícolas de la zona tienden a adquirir los insumos, tales como abonos orgánicos, en la región central de Guápiles. Por lo tanto, situar la planta de compostaje en este distrito representa una ventaja al facilitar la distribución y venta de los productos terminados. Esta ubicación estratégica no solo reduce los costos operativos, sino que también fortalece la relación entre la planta y su base de clientes clave, promoviendo la sostenibilidad y el éxito a largo

plazo del proyecto. Cabe destacar que la municipalidad está desarrollando un vivero de especies forestales y de ornamentales nativas para proyectos de reforestación y mantenimiento de parques, ubicado en el Plantel Municipal. El vivero municipal se encuentra adyacente al espacio construido para las pruebas de compostaje (ver Figura 10), ubicado en un terreno municipal propio que cuenta con espacio disponible para la expansión de la infraestructura.

Por lo tanto, se propone utilizar esta área para la ubicación de la planta de compostaje. Esta elección se basa en su posición estratégica en el distrito y dentro de la institución, lo que facilitaría las operaciones y evitaría un aumento en los costos de transporte. Además, su proximidad al vivero municipal facilitaría el aprovechamiento eficiente del producto final en el sitio. La **Figura 41**, muestra una imagen satelital del plantel municipal y señala el espacio disponible propuesto para el desarrollo de la infraestructura del proyecto.

Se busca que la localización de la planta también respalde los principios de la economía circular, priorizando la cercanía de los generadores de residuos y de los usuarios finales del compost para minimizar la huella de carbono asociada al transporte y promover el ciclo cerrado de materiales orgánicos dentro de la misma comunidad. La proximidad al vivero municipal, donde el compost puede ser utilizado directamente, es un ejemplo claro de cómo los residuos pueden ser convertidos en recursos valiosos que benefician a otros proyectos locales. Esta integración de actividades refuerza la resiliencia económica y ambiental de la región, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y circularidad.

Figura 41

Posible ubicación de la planta de compostaje en el Plantel Municipal, Guápiles, Pococí



Nota. Tomado de *Visor catastral de Municipalidad de Pococí*, 2023, (<https://visorcatastral.munipococi.go.cr/>).

5.3.2.2 Cantidad de residuos a tratar y diseño de las pilas de compostaje

Durante las pruebas de compostaje realizadas para el segundo objetivo, las pilas se configuraron en forma de montículos. No obstante, a pesar de mantenerse el mismo método y composición, se recomienda que, para el desarrollo óptimo del proceso, se configuren las pilas en forma de hileras. Esta recomendación se basa en lograr una mayor eficiencia de procesamiento de residuos y en la necesidad de aprovechar el espacio de manera más efectiva. En este sentido, la disposición adecuada del material en las pilas es un factor crucial para el éxito del proceso.

En el contexto del sistema propuesto, se debe seguir una regla fundamental: mantener la independencia física de cada Unidad de Compostaje (Uc). Esto implica que no se debe agregar nuevo material a una pila que ya ha sido conformada, lo que garantiza un proceso eficiente y controlado. Asimismo, al ser un sistema aeróbico natural, es decir, sin aireación forzada, la altura de las pilas no debe superar el rango de 1.5 m a 1.8 m, pues al ser mayor se compactaría el material afectando la aireación, lo que puede dar lugar a condiciones anaeróbicas (Aguirre et al., 2011 y Zink, 2022).

Primeramente, antes de calcular las dimensiones de cada pila, se debe tomar en cuenta la cantidad inicial de residuos orgánicos y el total considerando los insumos que conformarán las pilas. El cálculo promedio por día de recolección se desarrolló en la **Ecuación 5** y con base en las pruebas de compostaje realizadas, las cantidades recomendadas se detallan en la **Tabla 24**:

Tabla 24

Insumos y cantidades iniciales de los residuos a compostar por día de recolección

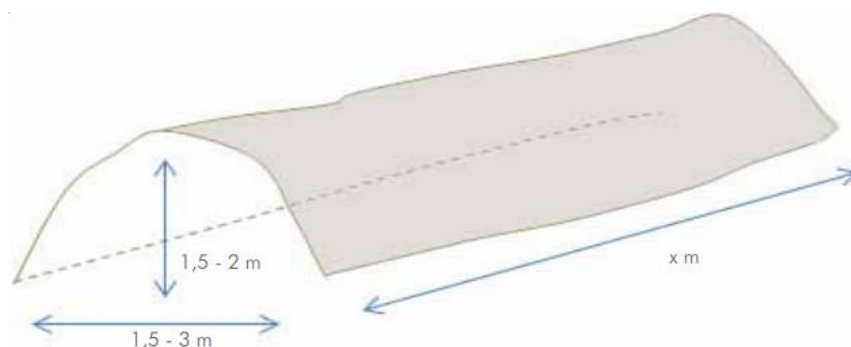
Insumo	Cantidad (kg)	Detalle
Residuos orgánicos	3500	Promedio de generación calculado cada dos días para 136 comercios. Se recomienda la recolección 3 días por semana (lunes, miércoles y viernes).
Burucha de madera	350	Equivalencia en volumen 50-50 de la cantidad de RO. Puede considerarse el 10 % de los RO.
Compost maduro	270	Se recomienda un 7 % del peso total de la base (RO + Burucha).

Durante las pruebas de compostaje realizadas en la fase 2 se agregó aproximadamente un 12 % de burucha de madera de la cantidad de residuos orgánicos, para una relación C/N de 35. El proceso de cálculo se puede apreciar en el apartado “5.3.3.2.1 Etapa pre-campo: Cálculo de la Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)”. Sin embargo, el proceso de compostaje demoró 2,5 meses, por lo que para la propuesta se sugiera disminuir la cantidad de burucha a un 10 % para una relación C/N de 33, con el propósito de reducir el periodo de descomposición.

Ahora, se debe considerar la densidad del material para calcular las dimensiones necesarias. Según la FAO (2013), los residuos orgánicos compostables tienen una densidad inicial aproximada de 150 kg/m³ - 250 kg/m³. Sin embargo, conforme avanza el proceso, el tamaño disminuye y como resultado la densidad aumenta a un rango de 600 kg/m³ - 700 kg/m³. Teniendo en cuenta esta información, se hará el cálculo de las pilas tomando como referencia el promedio de densidad inicial, debido a que es cuando se encuentran en su estado menos compacto, dimensionando las pilas con los materiales en su forma inicial cuando ocupan la mayor área. A continuación, se muestra en la **Figura 42**, una imagen de referencia de la forma y dimensiones recomendadas para pilas en forma de hileras.

Figura 42

Dimensiones recomendadas de las pilas de compostaje



Nota. Tomado de *Manual de Compostaje del Agricultor* (p. 31), por FAO, 2013.

Teniendo la cantidad inicial de materiales por compostar y la densidad aproximada, es posible establecer las dimensiones de largo, ancho y altura a conveniencia considerando la disponibilidad de espacio, para esto se despeja la fórmula de densidad de la **Ecuación 6** y se sustituyen los valores en la fórmula de volumen de la **Ecuación 7**. La altura de las pilas puede variar de acuerdo con las necesidades y el tipo de aireación, el rango para aireación natural es de

1,5 m a 2,0 m (Röben, 2002). En el caso de la propuesta se recomienda una altura de 1,5 m para evitar la compactación y dificultades al realizar los volteos.

Datos necesarios:

- a) Media diaria de 4 120 kg de insumos orgánicos.
- b) Densidad inicial promedio de 200 kg/m³.
- c) Altura recomendada para las pilas de 1,5 m.

Ecuación 6

$$D = \frac{m}{V} \quad \gg \quad V = \frac{m}{D}$$

Donde:

D: Densidad (kg/m³)

m: Masa (kg)

V: Volumen (m³)

Para el cálculo de las dimensiones de las hileras se utiliza la fórmula de volumen de un paralelepípedo rectangular (Ministerio de Ambiente y Agua, 2020). Considerando la información anterior, el cálculo del volumen de la hilera es el siguiente:

Ecuación 7

$$V = X \times Y \times Z$$

Donde:

V: Volumen (m³)

X: Longitud (m)

Y: Ancho (m)

Z: Altura (m)

$$V = \frac{4\,120\,kg}{200\,kg/m^3} = 20,6\,m^3$$

$$20,6\,m^3 = X \times Y \times 1,5\,m$$

$$X \times Y = \frac{20,6 \text{ m}^3}{1,5 \text{ m}} = 13,7 \text{ m}^2$$

Las dimensiones pueden variar de acuerdo con los intereses, disponibilidad de espacio y tipo de volteo utilizado. Teniendo en cuenta las necesidades de volteo de las pilas, los cuales se plantean inicialmente de tipo manual, se recomienda que la base de las hileras no sea demasiado ancha. A pesar de que algunos sistemas establecen una base de hasta 5 m, para el caso de esta propuesta se recomienda un ancho de 1,5 m, de modo que su manipulación manual no sea tan complicada (Ministerio de Ambiente y Agua, 2020 y Zink, 2022).

Considerando la información anterior, la longitud de las hileras se calcula a continuación y en la **Tabla 25** se muestra un resumen de las dimensiones recomendadas.

$$X = \frac{13,7 \text{ m}^2}{1,5 \text{ m}} = 9,1 \text{ m} \approx 9,0 \text{ m}$$

Tabla 25

Dimensiones recomendadas para las hileras

Dimensión	Valor
Largo	9,0 m
Ancho	1,5 m
Alto	1,5 m
Volumen	20,6 m ³
Peso	4,12 ton

Se debe tener en cuenta que a pesar de que los valores iniciales son altos, durante el proceso de compostaje el tamaño de las hileras disminuye hasta un 50 % por la compactación, descomposición y pérdida de carbono en forma de CO₂ (Ministerio de Ambiente y Agua, 2020). Por lo tanto, se recomienda realizar una pila por cada día de recolección con las dimensiones propuestas, aunque si se considera necesario pueden realizarse dos dividiendo el volumen para facilitar los volteos.

5.3.2.3 Capacidad de tratamiento

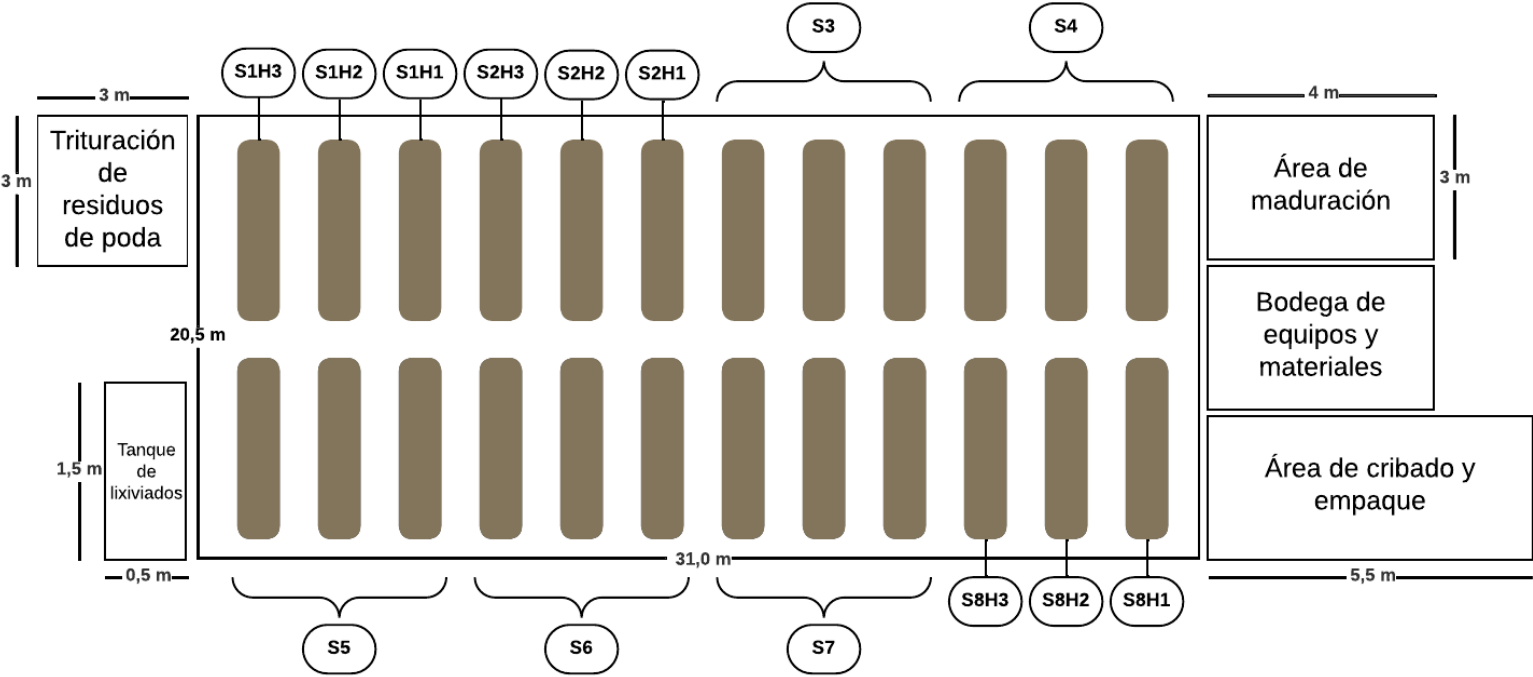
Basándonos en la recolección promedio de 3,5 ton de residuos diarios, con una recolección de tres días a la semana los lunes, miércoles y viernes, se acumula un total de 10,5 ton semanales. Durante un periodo de 8 semanas estimado para el proceso de descomposición (equivalente a 2

meses), esta tasa resulta en la generación de un total de 84 ton de residuos orgánicos. Considerando que cada día de recolección se convierte en una pila de compostaje, se definirán las dimensiones de la planta para una capacidad de procesamiento de hasta 84 ton en el lapso de 8 semanas. En el **Anexo 11** se observan los datos de recolección de los diferentes gobiernos locales y el tamaño de las respectivas plantas, lo cual puede servir como guía a la hora de establecer las dimensiones.

Se calcularon las dimensiones del área de descomposición para la capacidad requerida tomando en cuenta el diseño de las hileras presente en la **Tabla 25**. Para acomodar las 24 pilas formadas a lo largo de 8 semanas se propone un diseño de sistema continuo, donde los residuos se introducen de manera periódica, lo cual permite que siempre haya pilas en diferentes etapas del proceso. La distribución propuesta de las hileras es de 12 colocadas de manera paralela a las otras 12 identificadas con su respectivo código de acuerdo con la semana y día de formación, como se puede apreciar en la **Figura 43**.

Figura 43

Distribución del área de la planta de compostaje



El diseño del sistema continuo se establece de la siguiente manera:

- Formación inicial de las pilas: Se inician formando 3 pilas con los residuos recolectados en la primera semana, cada una formada por día de recolección (lunes, miércoles y viernes).

Estas tres pilas tendrán un total de 12,36 ton (4,12 ton cada una), considerando los insumos de la **Tabla 24**.

- **Rotación semanal:** Cada día de recolección se añade una nueva pila y semanalmente se rotan de posición. Además, cada semana, una de las pilas más antiguas (la que ha estado en el proceso durante 8 semanas) se traslada al área de cribado y empaque, para luego pasar al área de maduración.
- **Progreso de las pilas:** Las pilas que estuvieron en progreso durante una semana avanzan a la semana 2, y las pilas de la semana 2 hacia la semana 3, y así sucesivamente.
- **Etiquetado de las hileras:** Se recomienda que cada hilera maneje un código que indique la semana en que se encuentra y el respectivo número de hilera, para identificar fácilmente la etapa del proceso en la que se encuentra. Se sugiera el siguiente formato: S1H1 (Semana 1; Hilera 1), S1H2, S1H3 ... S8H3. La “S” indicaría la respectiva semana y la “H” el orden en que se formó, tomando en cuenta que la planta está diseñada para 8 semanas y se forman 3 pilas por semana.

Para esto, se calculó un total de 685 m² considerando el área de las bodegas y un área de tratamiento de 635,5 m², con un espacio de 0,5 m en el centro que divide los dos bloques de 12 hileras, 1 m entre cada hilera y 1 m a cada lado de los bordes. Este diseño asegura una disposición eficiente y suficiente de capacidad para el tratamiento, para así mantener un proceso de compostaje continuo y efectivo al asegurar que siempre haya pilas en diferentes etapas del proceso, desde las más nuevas que recién se han formado hasta las más antiguas que están por ingresar a la etapa de maduración. Esto proporciona un flujo constante de compost a lo largo de las 8 semanas.

El dimensionamiento para la bodega de maduración se basó en el cálculo de la sección 6.2.2.1, considerando la producción mensual y anticipando la reducción de volumen al final del proceso, asegurando un espacio adecuado para almacenar los 38 m³ estimados de compost al mes. Se recomienda la instalación de estantes para aprovechar el espacio vertical y facilitar la organización, permitiendo un acceso más sencillo y una distribución uniforme del material. Además, es esencial garantizar la circulación de aire y monitorear los niveles de humedad. La bodega de equipos y materiales puede mantener las mismas dimensiones, considerando el tamaño del volteador de compost (Figura 45), como un equipo más voluminoso. Por su parte, el área de cribado y empaque debe contemplar especialmente que el trommel de tamizado, cotizado por la

empresa Ficmans, cuenta con 1 m de ancho y 3 m de largo, por lo que se sugiere que el espacio tenga al menos 5,5 m de largo para garantizar la eficiencia y comodidad durante las operaciones.

Finalmente, para definir las dimensiones del tanque de lixiviados se toma como referencia el estudio de Moreno et al., (2019), que indica que una planta de compostaje con 480 m³ de compost produjo diariamente 46,4 litros de lixiviados. Extrapolando estos resultados a los 494,4 m³ de compost estimados para la planta acorde al volumen de las hileras (Tabla 25), se estima una generación diaria de 47,8 litros de lixiviados. Para gestionar eficientemente este flujo y permitir su tratamiento, se propone un tanque de almacenamiento con capacidad para al menos una semana de producción (334,6 litros) debido a su potencial reutilización en el proceso. En este sentido, se recomienda un tanque rectangular de 375 litros (1,5 m de largo, 0,5 m de ancho y 0,5 m de profundidad), ajustando las dimensiones según necesidades específicas de la planta y los requisitos del sistema de tratamiento.

5.3.2.4 Criterios que considerar en el diseño de las instalaciones

5.3.2.4.1 Zonificación

Se recomienda que la planta de compostaje contemple como mínimo las siguientes áreas:

- Área de degradación: En este lugar, se recibe la materia prima, se mezclan los materiales y se forman las pilas de compostaje. En esta zona inicia el tratamiento combinando los residuos orgánicos con los insumos secos como la burucha de madera o restos de poda, junto a los aceleradores naturales como el compost maduro y los microorganismos. Además, se llevan a cabo los volteos y el monitoreo periódico de la humedad, temperatura y pH.
- Área de cribado y empaquetado: Después de finalizar el proceso de compostaje, el material se traslada a esta área donde se tamiza el compost para eliminar los residuos no deseados y las impurezas no descompuestas, las cuales se recirculan al área de degradación junto al material entrante. Una vez tamizado, se procede a su empaquetado en sacos, los cuales deben ser etiquetados para su posterior almacenamiento, con el fin de cumplir el respectivo periodo de maduración para su distribución y comercialización final.
- Área de maduración: Los sacos de compost empacados y etiquetados pasan a esta área. Aquí se desarrolla la fase final del proceso, donde se continúa con la maduración necesaria para la estabilización del producto. Esta etapa es crucial para mejorar la calidad del compost, permitiendo que alcance su estado óptimo para su uso.

- Bodega de equipo y materiales: En este espacio se almacenan herramientas, equipos y materiales necesarios para las operaciones de compostaje, como los tamices, las palas, los sacos de empaque, guantes e insumos necesarios, asegurando su disponibilidad y preservando su estado para su uso adecuado. Este sitio debe garantizar la total seguridad en infraestructura y vigilancia para preservar la integridad de los materiales y equipos.
- Tanque de lixiviados: El área de almacenamiento constituye una sección crítica en la infraestructura de la planta de compostaje. Su función principal radica en la captura y gestión de los líquidos generados durante el proceso. Este espacio cuenta con un sistema de recolección que canaliza los lixiviados desde las pilas de compostaje hacia un tanque de almacenamiento y su diseño incorpora medidas de impermeabilización para prevenir la filtración al entorno circundante.
- Trituración y almacenamiento de residuos de poda: Se propone un área específica equipada con una maquinaria trituradora especializada para los residuos de podas de los parques y áreas verdes del cantón, antes de su uso en la formación de las pilas. Se sugiere una estructura techada y parcial o totalmente cerrada para proteger la maquinaria y los operadores de las condiciones climáticas adversas, que incluya un espacio de almacenamiento temporal del material triturado, asegurando su disponibilidad para su uso en el proceso de compostaje. Además, se deben garantizar las medidas de seguridad necesarias para evitar problemas ambientales o de seguridad.

5.3.2.4.2 Recomendaciones sobre la infraestructura

Para el diseño de la planta, se deben considerar las condiciones climáticas del área geográfica propuesta, caracterizadas por altas precipitaciones y temperaturas anuales, debido al clima tropical húmedo y muy húmedo predominante en la región (INDER, 2015). En este contexto, es importante realizar una estructura que considere estos factores e integre los principios de economía circular desde el diseño. Se recomienda utilizar materiales y recursos locales siempre que sea posible, así como materiales reciclados o reciclables, lo que puede reducir la huella de carbono del proyecto. La optimización de recursos es otro factor importante, para esto, la inclusión de estructuras que permitan el ingreso de luz natural y una ventilación adecuada puede disminuir la necesidad de iluminación artificial y ventilación mecánica, ahorrando energía.

Además, para optimizar el uso del agua, se sugiere incorporar sistemas de recolección de agua de lluvia para el riego de áreas verdes y el proceso de compostaje, reduciendo la dependencia de fuentes de agua potable. Aprovechar los materiales y recursos existentes en el terreno es

igualmente importante. Se puede reutilizar concreto de demolición para bases o caminos, perlin de construcciones anteriores para nuevas estructuras y malla serán reutilizada o fabricada con materiales reciclados. Finalmente, al contemplar el modelo de economía circular en el proyecto es fundamental considerar la responsabilidad ambiental de los proveedores en las compras municipales, eligiendo aquellos que ofrezcan productos con certificaciones de sostenibilidad o que utilicen materiales que promuevan un ciclo de vida más eficiente y responsable de los recursos.

Las recomendaciones generales a tomar en cuenta sobre el diseño son las siguientes:

- Cobertura en paredes: Se deben instalar coberturas o revestimientos en las paredes de áreas críticas como el área de degradación para proteger de los fuertes vientos y el exceso de humedad provocada por las lluvias. Se puede considerar el uso de perlin de acero galvanizado para la infraestructura y malla serán de plástico doble para las paredes, debido a su alta resistencia para las áreas propensas a la humedad. A su vez, estos materiales son duraderos, resistentes a la corrosión, económicos y fáciles de limpiar.
- Elección de suelo: Se aconseja optar por superficies de suelo impermeables como concreto para prevenir la infiltración de lixiviados y garantizar una gestión controlada al facilitar su recolección mediante sistemas de drenaje. Además, la utilización de materiales antideslizantes para la seguridad del personal, especialmente durante condiciones climáticas adversas.
- Sistemas de recolección de lixiviados: Implementar sistemas de recolección de lixiviados que se integren a la inclinación del suelo, utilizando canaletas distribuidas entre las hileras para dirigirlos hacia el tanque de almacenamiento.
- Inclinación del suelo: Diseñar una inclinación del suelo de al menos el 2 % en áreas propensas a la acumulación de lixiviados para facilitar la recolección y el transporte hacia el tanque de almacenamiento para su posterior tratamiento.
- Drenaje pluvial: Diseñar un sistema de drenaje pluvial eficiente, incluyendo zanjas y desagües, para prevenir inundaciones y evitar que el agua de lluvia afecte las áreas de compostaje y almacenamiento.
- Aislamiento de áreas: Separar las áreas sensibles, como la de maduración, almacenamiento y bodega de materiales con barreras físicas que brinden una mayor protección del entorno circundante y seguridad ante posibles robos. Si se construyen estas áreas sobre la misma superficie de tratamiento, se sugiere ubicarlas a un nivel más elevado para protegerlas de posibles afectaciones por lixiviados.

5.3.3 Tercer apartado: Aspectos técnicos de operación

5.3.3.1 Tipo de sistema

El sistema de compostaje centralizado propuesto se basa en la tecnología de pilas aeróbicas dispuestas en forma de hileras, implementando un enfoque semi mecanizado para la gestión eficiente de los residuos orgánicos. Este método, inspirado en el método Indore, se caracteriza por su configuración de pilas aeróbicas en hileras sobre una losa de concreto, lo que evita el contacto directo de los lixiviados con el suelo facilitando su recolección y mejorando la calidad del compostaje, al mismo tiempo que previene la aparición de olores desagradables. Además, la propuesta se basa en un sitio semi abierto, que permita la circulación del aire, pero impida el acceso directo a vientos fuertes y lluvias, teniendo en consideración las condiciones climáticas de la zona.

Para alinear el proyecto a los principios de la economía circular, es esencial considerar varios aspectos clave. Como se mencionó en el apartado anterior, es importante maximizar el uso de recursos mediante la selección de materiales reciclados o reciclables en la construcción de la planta y optimizar el consumo de agua y energía. Se debe priorizar el uso de insumos locales, como burucha de madera o aserrín de aserraderos cercanos, para reducir el impacto ambiental y fortalecer la economía local. Además, es importante procurar que el compost se utilice localmente y que los lixiviados se capturen y reutilicen como fertilizantes líquidos. Ubicar la planta cerca de los generadores de residuos y consumidores de compost también ayuda a minimizar el transporte y las emisiones de carbono, promoviendo un sistema más sostenible y eficiente a largo plazo.

El proceso se enfoca en condiciones aeróbicas, promoviendo la acción de microorganismos beneficiosos y la distribución uniforme del oxígeno. Con el fin de garantizar la eficiencia necesaria en el proceso de aireación propio del compostaje aeróbico, se sugiere utilizar la técnica de volteo mecanizado al menos una vez a la semana, sujeto a las necesidades de las pilas determinadas por los parámetros de humedad y temperatura. Sin embargo, es posible considerar la implementación de un sistema de volteo manual en las etapas iniciales del proyecto debido a su menor costo de inversión y su viabilidad en instalaciones de menor escala. Esta elección permitirá comenzar el proceso de manera efectiva y avanzar gradualmente en la gestión de los residuos orgánicos.

A medida que el proyecto se desarrolle y aumente la cantidad de residuos por procesar, se puede considerar la inversión en sistemas mecanizados. Entre las opciones disponibles, se encuentran el volteador lateral de tornillo adaptado a un tractor, una pala frontal de tractor, o una volteadora de compost, todas diseñadas para facilitar el volteo y aumentar la capacidad de

procesamiento. Sin embargo, independientemente del equipo seleccionado, es crucial establecer un programa de mantenimiento y reparación constante para prolongar la vida útil del equipo y asegurar un rendimiento óptimo. Esta inversión en sistemas mecanizados no solo acelerará el proceso de compostaje, sino que también contribuiría significativamente a la eficiencia general de la planta, beneficiando su operación a largo plazo.

Aunque se recomienda un enfoque semi mecanizado con maquinaria, debido a que combina eficiencia y control, hay que considerar que esto puede requerir una inversión inicial significativa. Por otro lado, el volteo manual y el de aireación pasiva son más accesibles en términos de costo, pero pueden ser menos eficientes y requerir un mayor esfuerzo humano. Por lo tanto, la selección del método adecuado deberá considerar estos factores para optimizar el proceso de compostaje en función de los intereses y necesidades específicas de la municipalidad.

5.3.3.2 Recolección de residuos

5.3.3.2.1 Separación en la fuente

Para avanzar hacia una economía circular en el desarrollo del proyecto, es esencial implementar un sistema eficaz de separación de residuos desde la fuente, pero evitando que esta genere residuos adicionales. Para ello, se recomienda establecer como requisito el depósito de los residuos orgánicos en recipientes reutilizables, como baldes, en lugar de utilizar bolsas plásticas desechables. Esta práctica no solo reduce el uso de plásticos de un solo uso, sino que también facilita la clasificación y el manejo de los residuos, mejorando la eficiencia del proceso.

La participación activa de los comercios y la comunidad es clave para el éxito del programa. Es por esto que, antes de la implementación, se debe llevar a cabo una campaña integral de capacitación y sensibilización con el objetivo de informar sobre el proyecto y las pautas a seguir para la separación y recolección de los residuos. Esta campaña debe informar a los ciudadanos y comercios sobre la importancia de la separación de residuos, el proceso de compostaje y los beneficios ambientales. Además, se pueden organizar sesiones de formación continuas y talleres prácticos para reforzar el aprendizaje y adaptar las prácticas a las necesidades locales.

Para incentivar la participación, se sugiere contemplar incentivos, como reconocimientos públicos por su compromiso ambiental, la obtención de certificados o descuentos en las tarifas de recolección de residuos. Las campañas de sensibilización pueden incluir temas relacionados con la reducción del desperdicio de alimentos, prácticas de compra sostenible y consejos para la

conservación eficiente de alimentos. Estas medidas no solo apoyan el éxito del sistema de separación, sino que también promueven una cultura de sostenibilidad en la comunidad.

Se deben contemplar las siguientes pautas para la separación en la fuente:

- Los recipientes no deben pesar más de 20 kg por razones de seguridad del personal de recolección, acorde a lo establecido en el Decreto Ejecutivo N° 11074-TSS.
- Se sugiere que las ramas provenientes de podas tengan un diámetro máximo de 10 cm y se empaquen adecuadamente en materiales como sacos que pueden ser reutilizados.
- Proveer la información detallada sobre los tipos de residuos a recibir, forma de separación, almacenamiento y frecuencias de recolección.
- Desarrollar y mantener un sistema de comunicación efectiva con los comercios, brindando canales para reportar problemas o inquietudes relacionadas con la recolección.
- Considerar establecer normativas locales que respalden la separación en origen de los residuos orgánicos y que impongan sanciones por incumplimiento.
- Realizar un seguimiento continuo de los comercios participantes y los volúmenes recolectados para evaluar el rendimiento del programa.
- Hacer campañas de capacitación sobre prácticas como la gestión eficiente de inventarios para minimizar el exceso de stock y el desperdicio de alimentos.
- Implementar medidas de control de calidad para asegurar que los residuos orgánicos sean aptos para el compostaje.

Con respecto a la cantidad de personal de recolección y el uniforme requerido, se propone que cada equipo esté compuesto por un conductor y dos recolectores, con el fin de acelerar el proceso y facilitar la recolección de contenedores pesados. Es necesario que el personal encargado de esta labor esté debidamente equipado y uniformado para garantizar su seguridad y la efectividad del proceso. El equipo y uniforme sugerido incluye los siguientes elementos:

- **Camisa:** La camisa, con la identificación y logo de la municipalidad, es una parte esencial del uniforme y facilita la identificación del personal encargado de la recolección.
- **Mangas:** Se deben brindar mangas que protejan los brazos de los trabajadores de la radiación solar durante el desarrollo de sus actividades.
- **Pantalones:** Uso de pantalones largos y resistentes para las condiciones laborales, que garanticen la comodidad y protección durante las actividades de recolección.

- **Guantes:** Proporcionar a los recolectores guantes resistentes que protejan sus manos durante la manipulación de residuos, asegurando su seguridad e higiene.
- **Calzado adecuado:** Utilizar calzado cómodo que proporcione soporte y protección al personal durante la recolección, minimizando el riesgo de lesiones.
- **Mascarilla:** Garantizar la provisión y uso de mascarillas es fundamental para la protección respiratoria de los recolectores, especialmente en situaciones donde puedan estar expuestos a olores o partículas.
- **Gorra o sombrero:** Este componente no solo forma parte del uniforme distintivo, sino que también protege la cabeza y el rostro de los recolectores de la exposición al sol.

El suministro del uniforme y equipo de protección debe ser proporcionado al personal responsable de la recolección y transporte. Este equipo debe ser sustituido dos veces al año o según la vida útil de cada elemento, asegurando que el personal siempre cuente con prendas y equipo en óptimas condiciones. Este enfoque garantiza no solo la eficiencia en la recolección, sino también la integridad, seguridad y salud del trabajador en el desempeño de sus funciones.

5.3.3.2.2 Frecuencia de recolección

Para asegurar una gestión eficiente y satisfacer las necesidades de los comercios, se propone un programa de recolección que opere al menos cada dos días (lunes, miércoles y viernes). Esta frecuencia garantiza una disposición adecuada, evitando la descomposición de los residuos y reduciendo los problemas de acumulación. En caso de dificultarse una frecuencia de tres días por semana, se recomienda como mínimo dos días, de preferencia lunes y jueves o lunes y viernes, de manera que se distribuya la cobertura de los días de la semana, tal y como establecen las municipalidades de Jiménez, Pérez Zeledón y Tilarán (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022).

A su vez, es necesario contar con horarios preestablecidos comunicados previamente para que los comercios sepan cuándo deben colocar sus residuos orgánicos para la recolección. Sobre los horarios de recolección, se sugiere considerar horas de la tarde para realizarla, debido a que es cuando la mayoría de los comercios se encuentran activos y permite recolectar una mayor cantidad de residuos, especialmente en sitios como sodas y restaurantes.

5.3.3.2.3 Logística de recolección

Para optimizar la eficiencia en la recolección, se debe emplear una flota de vehículos que garantice la capacidad de recolección del volumen necesario, donde la hermeticidad prevenga derrames y asegure el manejo adecuado de los residuos orgánicos. Además, se recomienda explorar

la posibilidad de utilizar camiones con combustibles alternativos a los fósiles, como camiones híbridos o eléctricos. En caso de no ser posible, se debe procurar que los vehículos actuales tengan el mantenimiento adecuado, diseñar rutas de recolección que cubran todos los comercios de manera organizada y minimizar desplazamientos innecesarios.

Este enfoque busca minimizar costos y emisiones de carbono en el proceso, reforzando su sostenibilidad. Asimismo, se debe capacitar al personal en prácticas de conducción eficiente para el ahorro de combustible y reducción de emisiones. Esta integración de prácticas y tecnologías asegura un manejo integral y eficiente de los recursos, alineándose con los principios de la economía circular. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se sugiere seguir las siguientes recomendaciones:

- **Recepción de residuos:** Para mantener el enfoque de economía circular y evitar la generación de residuos adicionales, es recomendable utilizar recipientes reutilizables como estañones o baldes para la recepción de residuos, siguiendo el ejemplo de la municipalidad de Jiménez. El uso de bolsas plásticas no solo implica una labor adicional en la planta de compostaje, al tener que abrir y retirar las bolsas, sino que también contribuye negativamente al impacto ambiental (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022).
- **Flota de vehículos:** Utilizar inicialmente uno de los vehículos de recolección de residuos ordinarios (ver Figura 12), ya que facilita el proceso de recolección y mezclado al verter directamente los residuos al camión, mejorando la eficiencia del proceso. No obstante, se debe garantizar que durante la recolección no se generen fugas de lixiviados, así como brindar la limpieza y mantenimiento adecuado de los vehículos cada día de recolección para evitar su oxidación y prolongar su vida útil. También es posible usar vehículos de cajón, equipados con contenedores herméticos para evitar derrames, estos recipientes vacíos pueden ser intercambiados con los recipientes llenos que serán retirados de los comercios, asegurando la ciclicidad del proceso. Sin embargo, esta segunda opción incrementa el consumo de agua y las labores del proceso por la limpieza de los recipientes.
- **Rutas eficientes:** Se plantea inicialmente utilizar la ruta ya establecida para la recolección de residuos ordinarios en el sector comercial, la cual se divide en tres sectores, debido a que esta cubre el mayor porcentaje de los comercios de la zona de manera organizada minimizando los desplazamientos innecesarios. No obstante, es necesario que los días de recolección abarquen los tres sectores y que se lleve un control de los comercios

participantes, así como identificar posibles establecimientos fuera de la ruta que sea importante incorporar por sus altos volúmenes de generación.

Es crucial implementar las modificaciones necesarias a la ruta para garantizar la eficiencia y la máxima cobertura de los principales comercios generadores de RO. Tecnologías como la monitorización en tiempo real de los camiones a través de GPS, telemática y sensores de peso, podría ayudar a recolectar datos sobre velocidad, tiempo de inactividad, consumo de combustible y carga del volumen, la cual permitiría ajustar las rutas y gestionar la carga, asegurando una recolección que reduzca costos operativos y emisiones de carbono.

- **Personal capacitado:** Se debe garantizar que el personal de recolección esté capacitado en la manipulación segura de residuos orgánicos y en el manejo de situaciones imprevistas como derrames, así como en la identificación de los residuos que no son recibidos en el programa, con el fin de asegurar el control de calidad en el proceso. A su vez, podría ser beneficioso impartir capacitaciones de conducción eficiente que abarquen temas como la conducción a velocidad constante, el uso adecuado de los frenos y el motor, y el seguimiento de rutas para evitar congestiones y minimizar el tiempo de inactividad.

5.3.3.3 Equipamiento

Se describe a continuación el equipamiento necesario para el desarrollo de las actividades, que se divide en maquinaria y materiales de apoyo (Tabla 26), equipos de medición (Tabla 27) y equipos de seguridad y protección personal (Tabla 28). Este listado presenta recomendaciones generales y debe ser adaptado según las necesidades específicas de la organización. Antes de adquirir nuevos materiales o equipos, es fundamental evaluar y optimizar el uso de los recursos existentes y brindar el mantenimiento adecuado para prolongar la vida útil del equipamiento, así como priorizar la reparación de equipos en lugar de la compra de nuevos, siempre que sea posible.

Tabla 26*Maquinaria y materiales de apoyo para las labores del proceso de compostaje*

Materiales	Descripción
Carretillo	Útil para el transporte de materiales o insumos.
Palas	Herramientas manuales para cargar, mezclar, cortar y mover los residuos orgánicos.
Machetes	Necesarios para cortar los residuos de gran tamaño que ayude a disminuir el tiempo de degradación.
Estañones	Contenedores resistentes para la recolección, almacenamiento temporal y pesaje de los residuos orgánicos.
Wincha	Para la medición de las pilas de compostaje, garantizando la uniformidad de las dimensiones.
Plástico	Para cubrir las pilas, garantizando la temperatura adecuada y brindando protección contra vientos, lluvias y animales.
Bomba fumigadora de 20 litros	Indispensable para realizar las labores de riego, atendiendo la demanda de humedad de las pilas.
Zaranda, criba o trómel	Necesarios para separar materiales no compostables o trozos más grandes del compost. Se recomienda el uso de un trómel, así como en las municipalidades de Alvarado, Pérez Zeledón, San Isidro y San Rafael de Heredia (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022).
Máquina trituradora	Se recomienda particularmente para la trituración de residuos de jardín como ramas y hojas.
Máquina volteadora	Considerar la adquisición de una máquina volteadora que facilite las labores de volteo. Existen diferentes opciones, de las cuales algunas son: Volteador lateral de tornillo adaptado a un tractor, pala frontal de tractor o específicamente una máquina volteadora de compost.

Respecto a la trituradora de residuos de jardín, la cual se muestra en la **Figura 44** como referencia, se recomienda su uso debido a la posibilidad de aprovechar los restos de ramas y hojas generados durante el mantenimiento de los espacios verdes del cantón. Estos restos pueden ser incorporados en la mezcla inicial como insumos secos que aportan carbono. La inclusión de estos materiales triturados, junto con otros como la viruta de madera, mejora la estructura del compost y la relación C/N (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022). Además, al triturar y almacenar esta considerable cantidad de residuos resultantes de las podas, se evita su envío al relleno sanitario, promoviendo la reducción del impacto ambiental, los costos de transporte y tratamiento.

Figura 44

Máquina trituradora para residuos de jardín



Nota. Tomado de *Trituradora GMT* [Fotografía], por Vedova y Obando (V&O) Forestal, 2023, (<https://www.vyoforestal.com/categoria/trituradoras/>).

Una vez que el compost está listo, es crucial someterlo a un tamizaje antes de su empaquetado y etiquetado para ofrecer un producto de aspecto homogéneo con fines de comercialización. Este proceso puede llevarse a cabo con diversas herramientas como zarandas, cribas o trómeles, ya sea adquiridas comercialmente o construidas de forma artesanal. La finalidad principal es separar las partículas más finas, de las partículas más gruesas que aún no han completado su proceso de degradación. En particular, se recomienda la consideración de un equipo tipo trómel como el presente en la **Figura 45**, ya que es el método preferido por muchos gobiernos locales debido a su sencillez de uso y eficiencia en el proceso de cribado (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022).

El trommel se usa para eliminar la fracción superior a 25 mm e impurezas pesadas mediante una mesa densimétrica que consiste en una criba rotativa constituida por un cilindro de malla que gira horizontalmente alrededor de un eje y posee una ligera inclinación para facilitar el avance del material y obtener dos tipos, los finos que caen por los orificios del cilindro y los gruesos llamados “rebose” que salen al final del trommel. La elección de la malla es crítica, siendo un valor típico el de 80 mm, de ser superior la cantidad de finos obtenida sería mayor, pero la materia orgánica estaría más contaminada, mientras que, si la malla es más angosta, se obtendrá una corriente de finos más pura, pero se perdería gran cantidad de materia orgánica (Garrido, 2015).

Figura 45

Máquina tipo trómel para el tamizaje del compost



Nota. Tomado de *Tamiz Rotativa para Biomasa CLR 950x1500* [Fotografía], por Lippel, 2023, (<https://www.lippel.com.br/tamices-rotativos/tamiz-rotativa-para-biomasa-clr-950x1500/?lng=es>).

Si bien se plantea inicialmente seguir un proceso manual únicamente con el uso de palas, se sugiere posteriormente considerar la inversión en una máquina volteadora de compost, donde una de las posibilidades se muestra en la **Figura 46**. Esta máquina específica para voltear el compost tiene una capacidad 500 ton anuales, cifra que concuerda con la suma proyectada para el tratamiento en la Municipalidad de Pococí y sus dimensiones son aptas para las hileras. Además, la facilidad de operación garantiza que el personal lleve a cabo sus tareas de manera efectiva, mientras que el tipo de equipo ayuda a la aceleración del proceso aeróbico, reduciendo el tiempo necesario a un plazo de 8 a 12 semanas, según el tipo de materiales a compostar (Ideagro, 2023).

Figura 46

Máquina volteadora

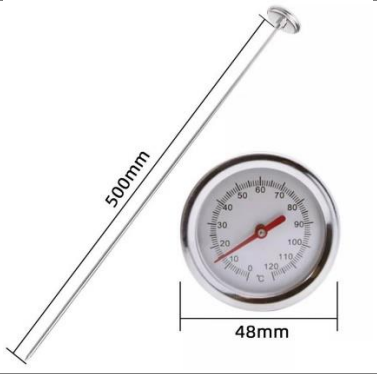





Nota. Tomado de *Volteador de compost TG 201*, por Gujer Innotec AG, 2023, ([https://www.gujerinnotec.com/en/maschinen/tg-201-\(gb\).html](https://www.gujerinnotec.com/en/maschinen/tg-201-(gb).html)).

A continuación, se describen en la **Tabla 27** los equipos de medición necesarios para registrar los valores diarios de los parámetros de control durante el proceso.

Tabla 27

Equipos de medición

Materiales	Descripción	Ilustración
Termómetro de compost	Para medir la temperatura en el interior de las pilas de compostaje y garantizar que se mantenga en el rango óptimo para el procesamiento.	
Medidor de humedad	Para controlar y ajustar el contenido de humedad en el compost de manera más precisa que utilizando la prueba de puño.	
Medidor de pH	Para medir el pH en el interior de las pilas, sirviendo como indicador y para garantizar que se mantenga en el rango.	
Balanza digital	Se recomienda una balanza digital con una capacidad de pesaje máxima de 500 kg para facilitar la cuantificación de los distintos insumos.	

Sobre los equipos de medición, cabe destacar que, a pesar de que la municipalidad actualmente dispone de un termómetro y un medidor de pH utilizados en la medición de los parámetros durante las pruebas de compostaje (consultar Tabla 10). Se recomienda adquirir un

termómetro de compost o suelo de mayor tamaño, dado que el aumento en las dimensiones de las pilas requiere una espiga lo suficientemente larga para llegar al centro. Además, es esencial obtener un medidor de pH de suelo que pueda realizar mediciones directas en campo, con el fin de mejorar la eficiencia del proceso. En este sentido, se puede considerar la adquisición de un dispositivo que también mida la humedad, lo que proporcionaría datos más precisos para garantizar las condiciones óptimas. Finalmente, se mencionan en la siguiente **Tabla 28**, los equipos de seguridad y protección personal necesarios durante las actividades del proceso de compostaje:

Tabla 28

Equipos de seguridad y protección personal

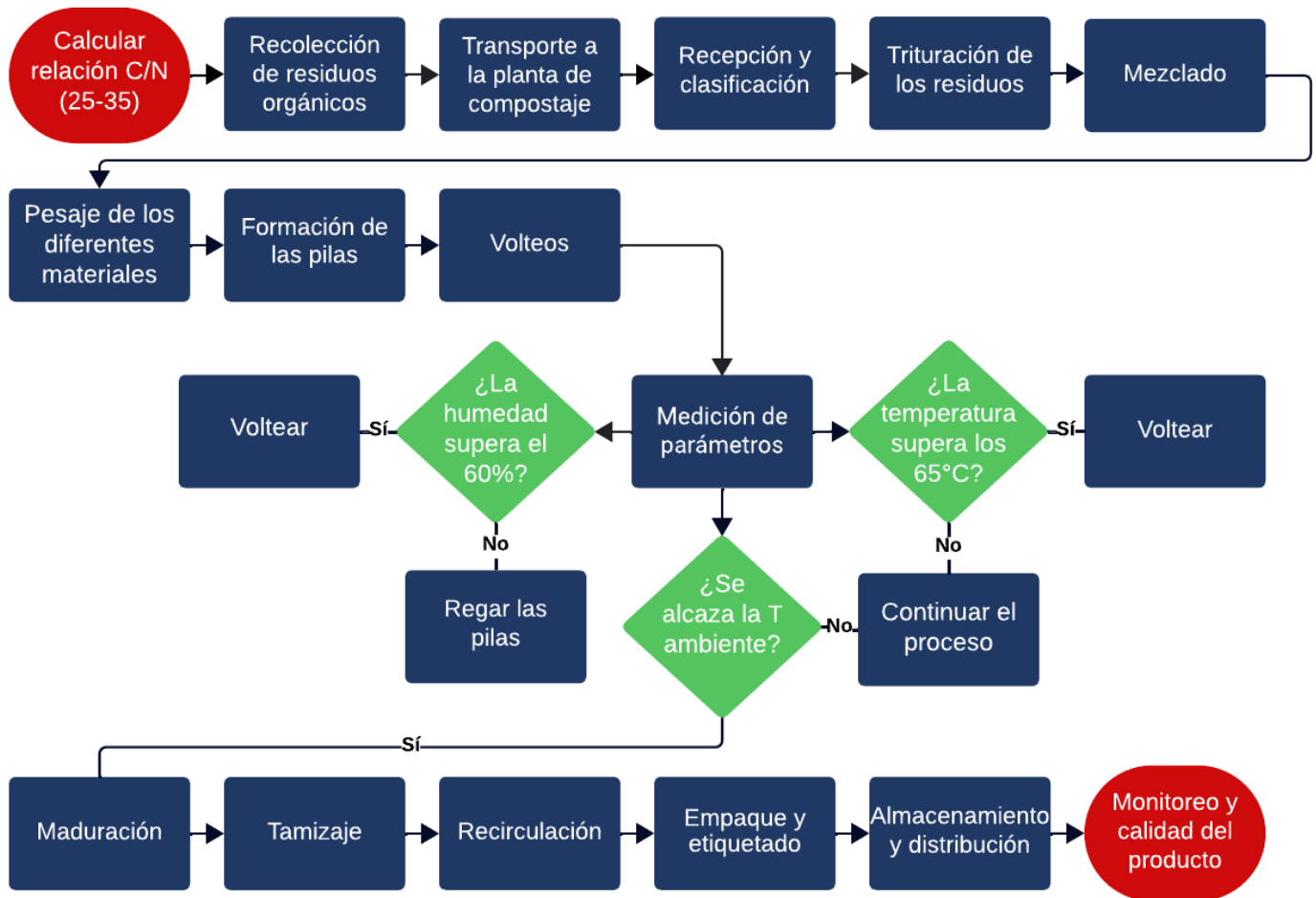
Materiales	Descripción
Guantes	Impermeables y resistentes para proteger al personal de la exposición a sustancias.
Botas	Botas de trabajo de hule para mantener los pies secos y seguros.
Mascarillas	En caso de que se generen olores desagradables durante el proceso de compostaje.
Ropa de trabajo	Ropa resistente, fresca y de manga larga para proteger la piel.
Trajes de protección	Trajes protectores para las labores de mezcla, picado y lavado del camión que garanticen la higiene y seguridad de los trabajadores.
Equipos de seguridad	Incluye extintores, sistemas de prevención de incendios, señalización de seguridad y cualquier otro equipo necesario para garantizar la seguridad en el sitio de compostaje.

5.3.3.4 Procedimientos

En esta sección, se presenta una descripción general de los procedimientos recomendados para la planta de compostaje. A través de un diagrama de flujo (Figura 47), se esquematiza cada uno de los pasos cruciales, desde el cálculo de la relación C/N hasta el monitoreo y la evaluación de la calidad del producto final. Este enfoque proporciona una visión clara y estructurada de la implementación de las operaciones, facilitando su comprensión. Los detalles de la metodología pueden ser consultados en la sección de marco metodológico referente al segundo objetivo, donde se describe cada paso desde la recolección hasta la culminación del proceso de maduración.

Figura 47

Secuencia de operaciones clave en el proceso de compostaje



- 1. Calcular Relación C/N (25-35):** Antes de iniciar el compostaje, se realiza un cálculo de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) en el material de entrada. Esta relación debe mantenerse en un rango óptimo de 25-35 para fomentar la descomposición efectiva de la materia orgánica.
- 2. Recolección de residuos orgánicos:** Se lleva a cabo el proceso de recolección de los residuos en los comercios locales del distrito de Guápiles, asegurando que estén separados de otros residuos no orgánicos.
- 3. Transporte a la planta de compostaje:** Los residuos recolectados se transportan a la planta de compostaje centralizada utilizando uno de los camiones municipales de recolección de residuos ordinarios.

4. **Recepción y clasificación:** En la planta, los residuos se reciben y se someten a un proceso de clasificación para eliminar materiales no deseados, como plásticos y metales que puedan venir entre el material a compostar.
5. **Mezclado:** Los residuos orgánicos tanto crudos como cocinados se mezclan homogéneamente para asegurar una distribución uniforme de los materiales.
6. **Pesaje de los diferentes materiales:** Durante el proceso, se pesan y registran los distintos materiales utilizados, lo que permite un control preciso de la cantidad de insumos y garantizar el cumplimiento de la relación C/N de la mezcla inicial.
7. **Formación de las pilas:** El material mezclado se dispone en pilas o hileras para comenzar el proceso de compostaje, alternando los residuos secos como la burucha de madera o ramas trituradas, con los frescos provenientes de los comercios.
8. **Volteos:** Se realizan volteos periódicos de las pilas para garantizar la distribución uniforme del oxígeno y acelerar la descomposición. Se recomienda realizar dos volteos semanales durante las primeras 4 semanas y uno semanal las semanas restantes hasta culminar el proceso, a menos que la temperatura indique la necesidad de realizar un volteo adicional.
9. **Medición de parámetros:** Se mide y monitorea diariamente la temperatura, humedad y pH, parámetros clave para asegurar que las condiciones sean óptimas para la descomposición.
10. **Maduración:** Una vez completado el proceso de compostaje, el compost pasa por una etapa de maduración de al menos un mes para asegurar su estabilización.
11. **Tamizaje:** El compost se tamiza para eliminar partículas gruesas y obtener un producto final fino y homogéneo para la comercialización.
12. **Recirculación:** Las partículas gruesas no descompuestas que no pasan por la malla, trómel o sarán durante el proceso de tamizaje se pueden reincorporar al sistema para un nuevo ciclo de compostaje.
13. **Empaque y etiquetado:** El compost final se empaqueta y etiqueta para su comercialización, incluyendo información relevante sobre la composición del producto.
14. **Almacenamiento y distribución:** El compost empacado se almacena y distribuye a los comercios interesados en su comercialización, así como a los usuarios finales, como agricultores, jardineros y paisajistas. Además de sitios de donación como escuelas y colegios, y para su uso en el mantenimiento de parques.
15. **Monitoreo y calidad del producto:** Se realizan controles de calidad para asegurar que el compost cumple con los estándares necesarios y está listo para su uso. El monitoreo constante es fundamental para garantizar la calidad del producto final, por esto se recomiendan análisis

químicos periódicos para evaluar los porcentajes de nutrientes y microbiológicos, en caso de incorporar excretas animales entre los insumos del compostaje.

5.3.3.5 Parámetros de control durante el proceso

Considerando que este tema ya se abordó ampliamente a lo largo del documento, a continuación, se detallan de manera concisa los aspectos más importantes relacionados con los parámetros recomendados para la medición a lo largo del proceso de degradación.

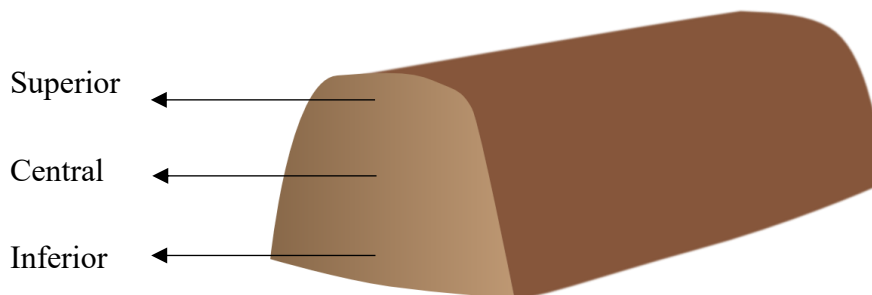
Temperatura

La temperatura a lo largo del proceso debe mantenerse en el rango de 35 °C - 70 °C, pues en ambos extremos se inhibe la actividad de los microorganismos (FAO, 2013). Sin embargo, el rango termófilo comienza a partir de los 40 °C y se recomienda que el compost alcance y mantenga una temperatura superior a los 55 °C durante 5 a 7 días para su higienización (Peng et al., 2023). Para la medición de la temperatura se recomienda medir diariamente en distintos puntos de la pila, con el fin de obtener un promedio, colocando la espiga del termómetro en la parte superior, inferior y central de la hilera (ver Figura 48). De no ser posible la frecuencia o cantidad de puntos de muestreo sugeridos, como mínimo se recomienda medir tres días a la semana y priorizar en centro.

- Método de medición: Emplear un termómetro de compost con espiga larga de al menos 0,5 m de largo como el mostrado en la **Tabla 27**. Se debe insertar el termómetro en parte superior, inferior y central a lo largo de varios puntos de la hilera, esto proporcionará un promedio más representativo de la temperatura en la totalidad de la pila. Si se alcanza los 70°C se recomienda realizar un volteo con el fin de airear el sistema, pues como se mencionó, superar este valor pondría en riesgo la actividad de los microorganismos.

Figura 48

Puntos de medición de la temperatura en las hileras



pH

Existen diversos rangos recomendados sobre el pH tanto durante el proceso como para el producto final, no obstante, en términos generales es posible dividirlos como rango aceptable y rango óptimo. En el aceptable se incluye el pH mínimo y máximo que se sugiere durante el proceso, el cual según diversos autores va de 5,5 a 9,0 (Zhang & Sun, 2016, Cao et al., 2019, Fouguitara, 2023, Margaritis et al. 2023 y Rastrogi et al. 2020 y Xie et al. 2023). Mientras que para el rango óptimo se recopilan los valores más selectivos citados por diversos estudios, el cual es de 6,0 a 8,0 (Zhang & Sun 2016, Moubareck et al. 2023, Cao et al., 2019 y Xie et al. 2023).

Se debe recordar que durante el proceso un pH superior a 9,0 limita la actividad microbiana y aumenta la liberación de amoníaco (NH₃). Mientras que para el producto final se sugiere un pH entre moderadamente ácido y moderadamente básico, oscilando entre 6,0 y 8,0 para favorecer el óptimo crecimiento de las plantas (Xie et al. 2023 y Moubareck et al. 2023). Con respecto a la medición de este parámetro, existen dos métodos, uno directamente en la pila y otro en un extracto de compost en solución acuosa; este último se utilizó en las pruebas de la fase 2. No obstante, dado que este proceso es más lento, se recomienda adquirir un medidor de pH de suelo como el mostrado en la **Tabla 27** para facilitar el proceso utilizando el primer método de medición directa.

- Método de medición: Utilizar un medidor de pH de suelo portátil e insertarlo en la parte central de la pila, esperar unos minutos hasta que el valor de la pantalla se estabiliza para finalmente anotar el valor en una bitácora de registro. Se recomienda, al igual que con la temperatura, tomar las mediciones en varios puntos a lo largo de la hilera para establecer un promedio representativo de cada unidad.

Humedad

El rango óptimo que provee un ambiente adecuado para la actividad metabólica microbiana y el procesamiento de los residuos orgánicos es del 50 % - 60 % (Peng et al., 2022., Rastrogi et al., 2020 y Ermolaev et al., 2019). No obstante, se considera que un rango del 45 % - 65 % es apropiado para el éxito del compostaje y evitar problemas relacionados con la humedad (Margaritis et al., 2023).

- Método de medición: Utilizar un medidor de humedad para compost, este equipo permite analizar la cantidad de agua en la mezcla directamente en campo. Se deben tomar mediciones en diferentes puntos de las pilas, asegurándose de medir áreas representativas

como las de la **Figura 48** y a lo largo de las hileras para obtener un promedio del contenido de humedad.

Aunque la **Tabla 3** detalla los parámetros importantes a considerar durante el proceso de compostaje, los rangos sugeridos son muy amplios. Por lo tanto, en la **Tabla 29** se presenta un resumen más riguroso de los parámetros considerados razonables y óptimos durante el proceso.

Tabla 29

Resumen de los rangos recomendados para los diferentes parámetros

Parámetro		Rango razonable	Rango óptimo
Relación C/N	Inicial	20:1 – 40:1	25:1 – 35:1
	Final	10:1 – 40:1	10:1 – 25:1
Temperatura (°C)		45 – 66	55 – 60
pH		5,5 – 9,0	6,5 – 8,0
Contenido de humedad (%)		40 – 65	50 – 60

Nota. Compilado de datos. Tomado de distintas fuentes citadas a lo largo de los resultados y discusión del documento.

5.3.3.6 Recurso humano

Para la implementación exitosa de la planta, se necesita una asignación estratégica de recursos humanos. Los operadores de proceso son los encargados de llevar a cabo las tareas manuales fundamentales, asegurando la calidad durante todas las etapas. La supervisión es responsable de dirigir y coordinar las operaciones diarias, mientras que el personal de mantenimiento desempeña un papel vital en la conservación de maquinaria e instalaciones. A su vez, el personal administrativo supervisa las operaciones generales y administrativas. Cada uno de estos roles desempeña una función clave en el éxito global de la operación.

El **Anexo 11** tiene información sobre la cantidad del personal y de residuos tratados en las seis plantas actualmente operativas en el país, lo cual se ha empleado como punto de referencia para la formulación de la propuesta detallada a continuación. Al evaluar la relación entre el número de trabajadores y la capacidad de tratamiento en cada municipio a comparación de las 42 ton mensuales previstas para la planta de la Municipalidad de Pococí, se calculó un promedio general de 12 personas. Es crucial señalar que este valor es meramente orientativo, ya que se observa una variación significativa entre los municipios, influenciada por las características específicas de las plantas y sus procesos. Por lo tanto, en el marco de esta propuesta se recomienda lo siguiente:

1) Encargados de recolección:

- Se recomiendan de 2 a 3 personas para realizar el proceso de recolección, preferiblemente un chofer y dos recolectores, con el fin de facilitar y acelerar el proceso, especialmente cuando se retira el contenido de contenedores pesados.

2) Operadores de proceso:

- De 2 a 4 personas para la formación y volteo de pilas.
- De 1 a 2 personas para la preparación de insumos como la trituración de residuos de poda y el apoyo a las labores de formación y volteo de pilas en caso de ser necesario.

Durante la entrevista con el responsable del proceso en la Municipalidad de San Rafael, se destacó que, en un tratamiento manual, se aconseja no sobrepasar una capacidad de 700 a 1 000 kg de residuos orgánicos por trabajador. Considerando la proyección de 3,5 ton de residuos orgánicos más insumos cada día de recolección, se propone un rango de 4 a 6 trabajadores para las labores de formación de pilas y volteo.

No obstante, esta cifra puede ajustarse según la demanda laboral, que se eleva especialmente en los días de recolección, formación de pilas y volteos, pero disminuye durante las mediciones. En este sentido, se pueden establecer jornadas parciales, tal como se ha implementado en las municipalidades de Jiménez, San Isidro y Tilarán (Municipalidad de Pérez Zeledón, 2021). Además, este esquema podría modificarse con la introducción de un sistema mecanizado para los volteos, como se sugiere en la **Figura 46**.

3) Supervisión:

- Se recomienda 1 supervisor para monitorear las operaciones diarias y asegurarse de que se sigan los procedimientos adecuados. Esta misma persona puede ser la responsable de realizar las tareas administrativas, como la gestión de inventario, documentación y coordinar lo relacionado con la comercialización del producto final.

4) Personal de mantenimiento:

- Se sugiere que al menos 1 persona se dedique a las tareas de mantenimiento de la maquinaria y equipos, con el propósito de asegurar su óptimo funcionamiento y prevenir daños.

5.3.4 Cuarto apartado: Gestión y administración

5.3.4.1 Calidad y características fisicoquímicas del producto final

El éxito del proceso de compostaje requiere de la obtención de un producto final que cumpla con los estándares de calidad y seguridad ambiental. Por lo tanto, este apartado detalla los criterios que definen la calidad del compost, siguiendo las directrices de la Norma Chilena NCh2880. Desde la humedad y el pH hasta la concentración de nutrientes y la presencia de impurezas, se exploran los parámetros cruciales para la clasificación del compost en Clases A o B. Además, se establecen los requisitos microbiológicos y las concentraciones máximas permitidas de metales pesados, asegurando así un producto final apto para su uso en prácticas agrícolas sostenibles y respetuosas con el ambiente.

En la **Tabla 30** a continuación se incluyen los parámetros de la norma con una clasificación por tipo con los valores definidos para los parámetros fisicoquímicos, nutrientes y concentraciones máximas de metales. Mientras que los requisitos microbiológicos se presentan en la **Tabla 31**.

Tabla 30

Concentraciones máximas de metales pesados de la NCh2880 para todos los tipos de compost

Metales pesados	Concentración máxima en mg/kg de compost (base seca) *	
	Clase A	Clase B
Arsénico (mg/kg)	15	20
Cadmio (mg/kg)	2	8
Cobre (mg/kg)	100	1 000
Cromo (mg/kg)	120	600
Mercurio (mg/kg)	1	4
Níquel (mg/kg)	20	80
Plomo (mg/kg)	100	300
Zinc (mg/kg)	200	2 000
Relación C/N	≤ 25	≤ 30
Conductividad Eléctrica (dS/m)	≤ 3	≤ 8
Materia Orgánica (%)	≥ 20	
Humedad (%)	30 – 45 %	
Tamaño partículas (mm)	≤ 16	
Densidad aparente (kg/m ³)	≤ 700	
pH	5 – 8,5	

**Concentraciones expresadas como contenidos totales*

Nota. Tomado de *Norma NCh2880: Compost - Clasificación y requisitos*, por Servicio Agrícola Ganadero (SGA) por el Instituto Nacional de Normalización (INN), 2004.

Otros parámetros fisicoquímicos:

- **Olor:** Todas las categorías deben presentar olores normales (olor a tierra fresca, similar al suelo forestal). Un olor desagradable, como amoníaco o sulfuro, podría indicar problemas de exceso de humedad, falta de oxígeno o desequilibrio en la proporción de materiales en el compost.
- **Impurezas:** Se refiere a materiales no deseados que no deben formar parte del producto final, como residuos inorgánicos, semillas de malezas o residuos orgánicos de gran tamaño. La norma indica que estas no deben superar los 15 mm para ambas clases de compost A y B.

La sugerencia de usar la norma NCh2880 como guía para determinar la calidad y los parámetros fisicoquímicos del compost se fundamenta en la necesidad de establecer estándares objetivos y reconocidos ante la ausencia de una regulación específica en Costa Rica. Esta norma ofrece criterios claros y científicamente respaldados para clasificar los compost en distintas clases y establece límites de parámetros cruciales como nutrientes, metales pesados y requisitos microbiológicos. Al seguir estos estándares, se busca asegurar la calidad del producto final y fomentar prácticas sostenibles en la gestión de residuos orgánicos en el contexto costarricense.

Tabla 31

Requisitos microbiológicos establecidos por la NCh2880 para todos los tipos de compost

Tipo de microorganismo	Tolerancia
Coliformes fecales	< a 1 000 NMP por gramo de compost en base seca
<i>Salmonella sp</i>	3 NMP en 4 g de compost en base seca
Huevos de helmintos	1 en 4 g de compost en base seca

NMP = Número Más Probable
 UFP = Unidad de Formación de Placas

Nota. Tomado de *Norma NCh2880: Compost - Clasificación y requisitos*, por Servicio Agrícola Ganadero (SGA) por el Instituto Nacional de Normalización (INN), 2004.

Se recomienda realizar análisis de laboratorio para evaluar los parámetros microbiológicos, de nutrientes y metales pesados en el compost con mayor frecuencia durante el inicio del proyecto y el primer año de operación, posiblemente trimestralmente, para comprender y estabilizar el proceso inicial. En los años siguientes, una frecuencia semestral puede ser suficiente una vez que el proceso esté estabilizado, ajustando según sea necesario. Además, para parámetros como pH,

humedad y temperatura, se aconseja un monitoreo diario para obtener datos más precisos y permitir ajustes inmediatos. Es fundamental realizar análisis adicionales después de eventos significativos o cambios en la materia prima o el proceso para garantizar una gestión efectiva de la calidad del compost y permitir modificaciones en busca de una mejora continua.

5.3.4.2 Consideraciones sobre el enfoque de economía circular

La producción de este compost sigue los principios de la economía circular al reutilizar eficientemente los residuos orgánicos locales y cuidar el uso de materiales. A su vez, se incorporan medidas de sostenibilidad y circularidad a lo largo de todo el proyecto, desde la construcción de la planta, la separación en la fuente, la recolección de los residuos, selección y mantenimiento de equipos y el desarrollo de prácticas de eficiencia energética y de consumo de agua durante el desarrollo del proceso de tratamiento.

Se prioriza la inclusión de insumos locales provenientes de procesos comerciales del cantón, como los residuos de frutas y verduras generados en sodas, restaurantes y verdulerías, la burucha de madera de un aserraderos de la zona y el compost maduro como activador biológico derivado de otro proceso de tratamiento, estos insumos demostraron un alto contenido de nutrientes que no solo mejoran la calidad del compost, sino que también representan un ciclo cerrado de recursos dentro de la comunidad. Este enfoque reduce la cantidad de residuos enviados al relleno sanitario y contribuye a la sostenibilidad local.

Además de las medidas incorporadas a lo largo del documento para promover la sostenibilidad y circularidad de recursos en el proyecto y con el objetivo de incentivar un modelo de economía circular en la zona de Guápiles, a continuación se detallan y retomamos de forma sintetizada algunos factores clave que se deben considerar para garantizar el cumplimiento de los principios de este modelo:

- **Generación y recolección de residuos orgánicos:**
 - **Reducción de la generación:** Aunque los residuos orgánicos son un subproducto inevitable de las actividades comerciales y su minimización total puede ser impracticable o indeseable debido a su impacto en la producción, es posible implementar estrategias efectivas para reducir la generación de desperdicios alimentarios. Esto se puede lograr a través de campañas de educación y concienciación que promuevan prácticas de manejo eficiente de alimentos y reducción de desperdicios.

- **Recolección eficiente:** El proceso de recolección debe diseñarse para minimizar el consumo de combustible y la emisión de gases de efecto invernadero. Con este fin, se puede evaluar la posibilidad de incorporar camiones recolectores que utilicen combustibles alternativos más sostenibles que los fósiles, como vehículos eléctricos o híbridos. Además, el monitoreo de rutas mediante tecnologías puede optimizar los recorridos, reduciendo desplazamientos innecesarios. La capacitación de los funcionarios en prácticas de conducción eficiente también puede contribuir a la reducción de emisiones y al uso responsable de los recursos.
- **Procesamiento del compostaje:**
 - **Materiales y tecnologías:** Es crucial priorizar el uso de materiales locales o de proveedores que garanticen su responsabilidad ambiental, tanto en la construcción de la planta como en los insumos del proceso de compostaje. A su vez, se debe utilizar una tecnología de tratamiento que maximice la conversión eficiente de residuos en compost, como el método aeróbico y semi mecanizado propuesto, al mismo tiempo que se garantice el monitoreo de parámetros a lo largo del proceso para las condiciones óptimas de aireación, humedad y temperatura que promuevan una descomposición adecuada y reduzcan las emisiones.
 - **Calidad y mejora continua:** Es importante hacer análisis del compost para garantizar que el producto final sea de alta calidad, libre de contaminantes y adecuado para su uso en la agricultura y jardinería, esto con el fin de completar el ciclo de nutrientes de manera efectiva y maximizar el valor de los residuos orgánicos al transformarlos en un recurso útil. A su vez, un proyecto como este requiere buscar continuamente oportunidades para innovar y adaptar el proceso, incorporando nuevas tecnologías, mejores prácticas y respondiendo a cambios en la demanda o en la generación de residuos. Esta orientación hacia la mejora continua garantiza la efectividad del compost y la sostenibilidad del proceso a largo plazo.
- **Embalaje y reutilización de materiales:**
 - **Materiales sostenibles:** En un proyecto basado en economía circular, uno de los objetivos fundamentales es minimizar la generación de residuos adicionales. Para lograrlo, se debe priorizar el uso de materiales reutilizados, biodegradables o reciclados en todas las etapas del proyecto. En lugar de emplear plásticos de un solo uso, se recomienda utilizar sacos reutilizables y colaborar con empresas que generan estos materiales como desechos, promoviendo su reutilización. Asimismo, para el empaquetado y transporte del compost a granel, se pueden emplear bolsas de papel, cartón o tela. Este enfoque asegura que los recursos

se mantengan en uso el mayor tiempo posible, minimizando el desperdicio y promoviendo prácticas más sostenibles.

- **Contenedores retornables:** Implementar un sistema de contenedores retornables para la entrega de compost ofrece una solución eficaz para fomentar la reutilización y reducir el desperdicio. Se recomienda establecer un programa de incentivos, como descuentos en futuras compras o beneficios adicionales, para motivar a los consumidores a devolver los envases usados que pueden ser los sacos o bolsas de tela. Además, durante la recolección, se deben emplear contenedores reutilizables para evitar el uso de bolsas plásticas y optimizar el manejo de los residuos.
- **Aplicaciones locales del compost:**
 - **Suministro al vivero municipal:** Utilizar el compost como insumo en la elaboración de los sustratos del vivero podría evitar la compra externa de abonos y aprovechar sus beneficios a nivel interno. Este material puede proporcionar el aporte de nutrientes para la siembra de las plantas y árboles que luego serán utilizados en campañas de reforestación y mantenimiento de áreas verdes del cantón, cerrando el ciclo de materiales y ayudando a la restauración de suelos.
 - **Mantenimiento de parques:** Usar el compost como abono en el mantenimiento de áreas verdes del cantón es otra recomendación para su uso, ya que podría mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento saludable de las plantas, al mismo tiempo que fomenta prácticas sostenibles al evitar el uso de fertilizantes químicos.
- **Alianzas estratégicas:**
 - **Colaboración con agricultores locales:** Se considera importante promover la colaboración con agricultores locales para comprender los desafíos agrícolas locales y maximizar el impacto positivo del compost en la agricultura regional. Ofrecer descuentos y asesoramiento técnico a los agricultores que incorporen el compost en sus cultivos les puede brindar una herramienta valiosa para mejorar la salud y productividad del suelo, al mismo tiempo que posiciona el producto en el mercado, asegurando así un producto que realmente beneficie a los usuarios y fortalezca la agricultura sostenible en la comunidad.
 - **Colaboración con empresas:** Es esencial identificar y mapear empresas que ya implementan prácticas de economía circular o que comparten una visión de sostenibilidad. Establecer alianzas estratégicas podría permitir adquirir envases y sacos para el proyecto, aprovechando los residuos de otros procesos y promover un ciclo de vida responsable. Además, la

colaboración con empresas comprometidas con la sostenibilidad facilita la promoción de prácticas comerciales responsables y refuerza el impacto positivo de la economía circular en la región. Esta cooperación apoya la reducción de residuos, reutilización de materiales e impulsa una red de negocios que contribuyen conjuntamente al desarrollo sostenible.

- **Involucramiento local:** Involucrar a la comunidad en el proceso de compostaje municipal podría ser beneficioso para fomentar un sentido de responsabilidad y colaboración en la gestión de residuos. Es importante que los ciudadanos conozcan sobre el proyecto y se aproveche para con centros educativos para impartir charlas de educación ambiental, creando conciencia sobre la importancia del compostaje y la gestión adecuada de residuos.

5.3.4.3 Recomendaciones de uso y comercialización

Este apartado aborda el uso y la comercialización del compost generado, proporcionando una serie de recomendaciones que aseguran su distribución eficiente y sostenible. Se busca mantener el enfoque de economía circular, promoviendo prácticas que maximicen el valor del compost, minimicen el desperdicio y fortalezcan la economía local. Estas recomendaciones abarcan aspectos de mercado y distribución, garantizando que el producto final cumpla con los estándares necesarios y se integre de manera efectiva en la cadena de valor agrícola y comercial.

1) **Descripción del producto**

El compost producido es un abono natural de alta calidad, elaborado a partir de una mezcla equilibrada de residuos orgánicos y burucha de madera derivada de procesos comerciales del cantón de Pococí. Este producto se caracteriza por su color café oscuro, textura terrosa y un aroma a tierra, resultado de un meticuloso proceso de tratamiento y maduración. Cumple con los estándares de la norma NCh2880, ofreciendo una rica combinación de carbono y nitrógeno que lo convierte en un suplemento nutritivo ideal para suelos y plantas. Además, contiene nutrientes esenciales como fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro y manganeso, proporcionando una solución efectiva para mejorar la fertilidad del suelo, sustituyendo los fertilizantes químicos y fomentando prácticas agrícolas sostenibles.

2) **Usos recomendados**

Las características obtenidas del compost indican una calidad nutricional adecuada para su aplicación en jardines, huertos y como mejorador de suelos. Los análisis de laboratorio sugieren que este compost puede promover el crecimiento saludable de plantas al proporcionar nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio. Además, puede mejorar la estructura del suelo,

aumentar la retención de agua y estimular la actividad microbiana, creando un entorno propicio para el desarrollo sostenible de la vegetación. La recomendación de uso incluye su aplicación en los sustratos de siembra de árboles y plantas en el vivero municipal, proporcionando compost de alta calidad como sustrato para los cultivos que se utilizarán en campañas de reforestación y embellecimiento de áreas verdes. También es posible su uso para el mantenimiento de parques y jardines, fomentando prácticas sostenibles y cerrando el ciclo de recursos.

En varios gobiernos locales, el compost se utiliza principalmente como mejorador de suelos, con aplicaciones específicas según el tipo y las propiedades del suelo. Por ejemplo, en San Rafael, se recomienda mezclar el compost con tierra en una proporción de 50:50 debido a su alta concentración. En Alvarado, se aconseja aplicar el compost durante la etapa de fertilización y no en la etapa de siembra. En Pérez Zeledón, el compost se emplea en el vivero municipal y se distribuye a las familias a través del programa de trueque verde, donde se intercambian residuos valorizables por compost. Además, se han realizado experimentos en cultivos como tomate, lechuga, culantro, chile dulce y café, para evaluar su efectividad y aplicación en diferentes tipos de suelos y condiciones agrícolas (Municipalidad de Pérez Zeledón. 2022).

Estos ejemplos pueden servir de referencia para estudiar el uso del compost en diversos cultivos y mejorar las recomendaciones de aplicación según las necesidades específicas de los agricultores y jardineros locales.

3) Comercialización:

Para comercializar el compost en Pococí primero es importante su registro, lo cual se aborda en el siguiente punto. En términos generales, se recomienda venderlo en puntos estratégicos como viveros, ferreterías y ferias agrícolas. Establecer asociaciones con comercios locales facilitará el acceso de los consumidores al compost y permitirá su integración en diversas prácticas del cantón. Es crucial realizar un estudio de mercado para identificar las necesidades y preferencias de los consumidores locales, así como para determinar los canales de distribución más efectivos. Este estudio también permitirá establecer precios competitivos y desarrollar estrategias de marketing adecuadas.

Inicialmente, es posible seguir el ejemplo de la Municipalidad de Pérez Zeledón e implementar un programa de trueque o incentivos, donde las familias puedan intercambiar residuos valorizables por compost para promover el reciclaje y la gestión sostenible de residuos. Colaborar con escuelas y centros comunitarios para utilizar el compost en proyectos educativos de jardinería y agricultura

puede crear conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad. El objetivo es posicionar el compost como un producto de alta calidad en el mercado local, y fortalecer la conexión entre la comunidad y la gestión sostenible de recursos, y avanzando hacia un modelo de economía circular.

Para fomentar el uso del compost, se puede ofrecer muestras gratis o descuentos a quienes participen en talleres y charlas sobre gestión integral de residuos y compostaje. Además, desarrollar campañas publicitarias en redes sociales y medios locales contribuirá a educar a la comunidad sobre los beneficios del compost y su impacto positivo en el medio ambiente, al mismo tiempo que incentivará su compra. Participar en mercados locales y ferias agrícolas permitirá promover el compost directamente a consumidores interesados en productos sostenibles y de alta calidad.

Finalmente, se pueden explorar oportunidades de venta en cooperativas agrícolas y asociaciones de productores locales. Establecer contactos con agricultores para vender compost a granel puede ser una estrategia efectiva, dado que Pococí es un cantón con una fuerte actividad agrícola. Promover el uso del compost en cultivos locales como banano, piña, y otros productos típicos de la región puede aumentar la demanda del producto.

- **Registro del compost para su comercialización para uso agrícola**

La Municipalidad de Pérez Zeledón (2022) detalla el proceso para la inscripción del producto, ante lo cual el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) es el ente responsable de su registro destinado a uso agrícola. Toda la información necesaria está disponible en la página web del SFE. El proceso de registro se detalla en el documento "Procedimiento de Registro y Modificación de Fertilizantes, Enmiendas y Bioestimulantes Agrícolas" (código AE-REG-PO-09 del 29 de septiembre del 2021), específicamente en el numeral 6.10, el cual se aplica para enmiendas naturales provenientes de fuentes animales o vegetales como compost, bocashi, lombricompost, pollinaza, gallinaza, cerdaza, caballaza, entre otros. Algunos de los documentos requeridos incluyen:

- Solicitud en el formato especificado.
- Certificado de registro, libre venta o de exportación del país de origen.
- Certificado de composición cualitativo-cuantitativo, indicando las fuentes o compuestos de donde proceden. Los contenidos de todos los componentes deben anotarse en porcentaje masa/masa (peso/peso) o masa/volumen.
- Certificado de análisis de una muestra específica, detallando los componentes con sus respectivos porcentajes.

- Proyecto de etiqueta que coincida con el certificado de composición.
- Análisis microbiológico de inocuidad del producto, indicando coliformes fecales, Salmonella, huevos de helmintos y Escherichia coli.
- Descripción del proceso de elaboración de la enmienda y control de temperatura.
- Instrucciones de aplicación y manejo de la enmienda, incluyendo dosis, frecuencia de aplicación y condiciones de almacenamiento.

Antes de registrar el compost, es necesario registrar la empresa (gobierno local), presentando el formulario correspondiente (Código AE-REG-PO-01_F-01) junto con:

1. Formulario de inscripción.
2. Personería vigente o copia certificada de la cédula de identidad para personas físicas.
3. Certificación de regencia vigente.
4. Copia certificada de la cédula de identidad del representante legal y del regente.
5. Certificación de inscripción en el Colegio de Ingenieros Agrónomos.
6. Documento que indique las personas autorizadas a realizar trámites.
7. Recibo de pago del canon de registro.

Los trámites se realizan en las oficinas centrales del MAG en San José. El costo del registro es de ¢128,104 y la anualidad de ¢73,636. El registro de la empresa (en este caso de la municipalidad), tarda aproximadamente 10 días y el registro del producto unos 2 meses, aplicable solo para el uso agrícola del compost.

4) Rotulado del producto: La norma NCh2880 indica que el compost debe acompañarse con la siguiente información relativa al producto:

- a. Nombre del productor autorizado, dirección y teléfono.
- b. Número de resolución de la Autoridad Competente, que autoriza el funcionamiento de la planta de compostaje productora de compost.
- c. Número de identificación de la partida del producto.
- d. Clasificación del producto en compost Clase A o B.
- e. Peso total.
- f. Porcentaje de materia orgánica total.
- g. Porcentaje de humedad.
- h. Relación C/N.

- i. Indicación de la existencia de la ficha técnica a disposición del usuario.
- j. Recomendaciones y restricciones de uso.
- k. Porcentaje de impurezas.
- l. Advertencias sobre toxicidad.

5) **Ficha técnica del producto:** Igualmente, la norma NCh2880 indica que el producto final debe contar con una ficha técnica disponible para los usuarios, que especifique la siguiente información adicional a la señalada en el rotulado:

- a. Método de compostaje utilizado.
- b. Principales materias primas utilizadas en el proceso.
- c. Conductividad eléctrica.
- d. pH.
- e. Contenido mínimo de N, P, K, Ca, Mg, S, Na, disponibles y de N y P totales (expresados como mg/kg).
- f. Contenido máximo de metales pesados.
- g. Recomendaciones adicionales de uso, como prohibiciones, restricciones, forma de aplicación y dosis de aplicación.

VI. Conclusiones

1. La evaluación en los sectores residencial y comercial indica una percepción mayormente positiva hacia el servicio municipal, con un 80 % de calificaciones "bueno" o "excelente". Esto se relaciona con la alta tasa de separación de residuos valorizables en hogares cerca del 70 %, y 65 % en el sector comercial. Sin embargo, factores como desconocimiento, inconsistencias en el servicio o limitaciones de espacio y tiempo afectan a un porcentaje significativo, siendo desafíos que deben abordarse para lograr una participación más amplia y efectiva.
2. El estudio reveló que solo el 25 % de los comercios y viviendas utiliza el camión municipal para la disposición de residuos orgánicos en el relleno sanitario. En el sector residencial, el entierro es el principal método para disponerlos y en el comercial, el uso como alimentación animal mediante acuerdos con productores locales. Aunque esto refleja una práctica de economía circular, la falta de regulación resulta en una trazabilidad deficiente de los residuos y animales, subrayando la necesidad de una gestión más estructurada de este proceso.
3. El interés en la recolección selectiva de residuos orgánicos es alto en el sector residencial (85%) y comercial (61%). Ambos sectores destacaron la importancia de la frecuencia de recolección para su participación, así como el interés en aprender sobre su manejo, lo que subraya la necesidad de considerar esta variable en el proyecto y fortalecer los programas municipales de capacitación enfocados en compostaje, algo crucial dada la relevancia agrícola y ganadera de la zona.
4. La generación residencial per cápita de residuos orgánicos en Guápiles dio un resultado comparable con otros cantones como San José, Alajuela, Belén, Barva y Turrialba, con un promedio de 0,30 kg/hab-día. En el sector comercial, las verdulerías destacaron como los principales generadores, que siendo el 17 % de los participantes, generaron el 58 % de los residuos, superando a restaurantes y sodas. Además, todas las verdulerías muestreadas ya separaban sus residuos para alimentación animal, lo que demuestra potencial como aliados estratégicos para el proyecto de compostaje.
5. El comportamiento térmico durante el compostaje fue consistente entre los tratamientos, con T1 (con MM como activador biológico), mostrando las temperaturas más bajas y un proceso más lento, similar al sistema de control (T0). Aunque no se observaron diferencias sustanciales, la presencia de compost maduro influyó más efectivamente, mientras que la elección de la mezcla de MM podría no haber sido óptima. A pesar de las variaciones, todos los tratamientos

aceleraron el tiempo de degradación en comparación con el T0, indicando que la adición de activadores biológicos, como MM y compost maduro, puede potenciar la eficiencia proceso.

6. Los tratamientos T0 y T1 exhibieron niveles de pH más alcalinos durante el proceso de compostaje, manteniéndose por encima del rango óptimo incluso al finalizar. La alcalinidad del compost, en especial cuando el $\text{pH} > 9$, puede limitar la actividad microbiana y afectar la calidad del compost. La composición de los materiales, el tipo de activador biológico y la exposición a condiciones climáticas adversas son los principales factores considerados determinantes en los resultados obtenidos, lo cual subraya la importancia de una cuidadosa selección de insumos y una gestión precisa del proceso para asegurar la calidad final.
7. Los resultados de laboratorio indicaron que todos los tratamientos tuvieron un elevado contenido de nutrientes con una relación C/N adecuada en el rango de 10,0 a 12,6. Sin embargo, el tratamiento con compost maduro T2C destacó como la opción más adecuada al presentar un equilibrio general de nutrientes, un pH de 8,63 y exhibir una buena disponibilidad de nitrógeno (relación C/N de 10,4), así como la presencia significativa de P y K y el cumplimiento de los límites establecidos para metales pesados como Cr y Zn.
8. La combinación de métodos centralizados y descentralizados para el tratamiento de residuos orgánicos en Guápiles ofrece una solución flexible y adaptada a las necesidades locales, alineado con los principios de economía circular. Al enfocarse en el sector comercial con un método centralizado de pilas con volteo manual, utilizando compost maduro como activador biológico (T2) y en el residencial con sistemas descentralizados como el uso de composteras rotativas y métodos alternativos artesanales a través del programa Pococí Composta, se pretende cerrar el ciclo de recursos y optimizar la gestión de residuos de manera eficiente.
9. La introducción paulatina de métodos mecanizados o semi mecanizados en las operaciones de una futura implementación de la propuesta destaca como un elemento clave para optimizar procesos y simplificar las tareas diarias. Estos enfoques no solo aceleran la ejecución de las actividades, sino que reducen la carga manual, disminuyen errores y promueven la eficiencia operativa. La mecanización emerge como una herramienta para mejorar la productividad y calidad en diversas áreas, facilitando el desarrollo de las actividades cotidianas.
10. Al evaluar el costo del proyecto de compostaje centralizado en Guápiles a corto plazo, no se percibe como económicamente rentable. Sin embargo, su necesidad es necesaria desde una perspectiva legal y de responsabilidad socio ambiental. En este contexto, se destaca la importancia estratégica de adoptar un enfoque de economía circular, combinando métodos

centralizados y descentralizados para abordar eficazmente los desafíos de la gestión de residuos.

VII. Recomendaciones

Recomendaciones dirigidas a la Municipalidad de Pococí:

1. Se sugiere al Departamento de Saneamiento Ambiental implementar guías y capacitaciones dentro del programa "Pococí Composta" para fomentar el compostaje descentralizado en la comunidad. Esta capacitación debe abarcar el uso de composteras rotativas y métodos artesanales alternativos, con el objetivo de aumentar la conciencia y reducir los residuos orgánicos destinados al relleno sanitario. A mediano y largo plazo, se propone incorporar gradualmente el compostaje centralizado en puntos estratégicos del sector residencial.
2. Es crucial establecer un sistema de monitoreo que incluya la medición y análisis de parámetros fisicoquímicos como relación C/N, temperatura, humedad, pH y aireación. En las etapas iniciales de la implementación, se deben realizar estudios fisicoquímicos detallados del abono, utilizando laboratorios especializados como INISEFOR, con el objetivo de evaluar y mejorar la calidad del compost y avanzar hacia la obtención de una marca municipal. Se debe realizar un seguimiento periódico de nutrientes, metales pesados y análisis microbiológicos, e incorporar parámetros adicionales como S, As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, conductividad eléctrica, materia orgánica y densidad, para ajustar el proceso según sea necesario.
3. Dado que la humedad desempeña un papel crítico en el proceso de compostaje, se recomienda adquirir un higrómetro para su control preciso y realizar volteos del material al menos dos veces por semana. Esto ayudará a evitar problemas asociados a procesos anaeróbicos o ralentización de la actividad microbiana, optimizando así el proceso de compostaje.
4. Para asegurar el desarrollo y la sostenibilidad del proyecto, es fundamental contar con un presupuesto sólido y constante que cubra aspectos clave como salarios, materiales, maquinaria, infraestructura, empaque, comercialización y análisis. Se sugiere explorar fuentes externas de financiamiento para garantizar la disponibilidad continua de recursos financieros.
5. Es necesario contar con al menos dos recolectores para mejorar la eficiencia en la recolección de residuos orgánicos y proporcionar capacitación anticipada a los funcionarios municipales sobre sus responsabilidades y el manejo adecuado de los residuos. Además, se debe informar a los usuarios sobre el límite de peso máximo de los contenedores (20 kg) para garantizar la seguridad de los trabajadores, de acuerdo con el Decreto N° 11074 – TSS.

6. Se recomienda establecer alianzas con municipalidades que ya cuentan con proyectos similares en funcionamiento. Esto permitirá un intercambio colaborativo de conocimientos y aprovechar la experiencia acumulada. Tales conexiones estratégicas pueden ayudar a identificar mejores prácticas, mejorar la eficiencia operativa y fortalecer la capacidad de gestión, contribuyendo así al éxito sostenible del programa Pococí Composta.
7. Considerar modificar los insumos de la mezcla de compostaje, explorando opciones como la adición de excretas de animales ricas en nitrógeno y evaluar otros tipos de microorganismos de montaña que demuestren una mayor efectividad, así como sistemas alternativos de aireación, tales como métodos forzados o mecanizados. Estas mejoras podrían enriquecer la composición del compost y optimizar el proceso.
8. Se sugiere explorar la posibilidad de regular las actividades informales de gestión de residuos orgánicos, especialmente aquellas vinculadas con porquerizas y ganaderías, en colaboración con el Ministerio de Salud y SENASA. Aunque actualmente hay alianzas entre generadores y usuarios de estos residuos como alimento animal, las prácticas no están controladas. Regularlas permitiría formalizar a las partes involucradas, asegurar el cumplimiento de las normativas y dinamizar la economía local, garantizando la trazabilidad y manejo adecuado de los residuos.
9. Dado que el análisis a corto plazo no reveló una alta rentabilidad en el proyecto, se recomienda realizar proyecciones económicas y financieras a mediano y largo plazo. Esto permitirá evaluar de manera más exhaustiva la viabilidad de implementación, considerando factores que pueden influir en su rendimiento y sostenibilidad económica.

Recomendaciones dirigidas a otros gobiernos locales que deseen incursionar en el tema:

1. Realizar un diagnóstico de la generación y disposición actual de residuos orgánicos, abarcando las fuentes, cantidades y métodos de disposición. Esta información permitirá diseñar un programa de compostaje ajustado a las necesidades específicas del área.
2. Establecer alianzas con municipalidades que ya cuentan con experiencia en proyectos de compostaje para intercambiar conocimientos y mejores prácticas. Colaborar también con instituciones académicas para aprovechar tesis y proyectos de graduación en la generación de información valiosa y en la evaluación continua del programa.
3. Garantizar un presupuesto adecuado y constante para el proyecto e investigar sobre fuentes externas de financiamiento que aseguren su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo.
4. Implementar un programa de compostaje que combine enfoques centralizados y descentralizados con una adopción gradual. Es fundamental integrar la educación ambiental y

proporcionar guías y capacitación para sensibilizar a la comunidad sobre la importancia y los beneficios del compostaje, promoviendo así una mayor participación y apoyo al programa.

Recomendaciones dirigidas a la academia:

1. Fomentar la investigación mediante tesis y proyectos de graduación para generar información valiosa sobre el tratamiento de residuos orgánicos a nivel nacional y el apoyo a los gobiernos locales. Establecer colaboraciones con municipalidades y organizaciones para desarrollar proyectos piloto y estudios de caso facilitará la transferencia de conocimientos entre la academia y la práctica, permitiendo a los estudiantes participar en proyectos reales y aplicar sus conocimientos en entornos prácticos mientras se contribuye a la mejora continua en las prácticas de gestión de residuos orgánicos.
2. Implementar talleres y cursos especializados en gestión de residuos orgánicos para estudiantes y profesionales. Estos programas deben abordar tanto los aspectos teóricos como prácticos y ofrecer certificaciones que validen las competencias adquiridas. Además, se recomienda integrar más el tema de economía circular y el tratamiento de residuos orgánicos en cursos y giras, tanto en métodos a gran escala como en técnicas alternativas. Esto preparará a los futuros profesionales para implementar eficazmente proyectos de compostaje en diversos contextos.
3. Dada la ausencia de regulación en Costa Rica que estandarice los parámetros de calidad del compost, la academia debería promover y apoyar el desarrollo de normas técnicas que definan estos criterios para su comercialización. Fomentar la creación de un marco normativo claro es esencial para garantizar que el compost cumpla con estándares de calidad que facilite su aplicación efectiva en la agricultura y fortalecer la práctica del compostaje.
4. Para avanzar en el campo del compostaje, se recomiendan las siguientes futuras líneas de investigación: estudiar tecnologías avanzadas de aireación, como sistemas de aireación forzada y métodos mecanizados, para mejorar la eficiencia del proceso; analizar variaciones en la composición de la mezcla para determinar combinaciones más eficientes y de mayor calidad; analizar la implementación de una economía circular a escala cantonal en diferentes ámbitos; realizar análisis económico y financiero a mediano y largo plazo para evaluar la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto, considerando costos operativos, ingresos por venta de compost, financiación externa y beneficios socioambientales; investigar innovaciones en el diseño de infraestructura de compostaje para mejorar la eficiencia y sostenibilidad; y finalmente, investigar la comercialización del compost en el mercado, analizando estrategias de marketing, canales de distribución y mejores usos del compost para maximizar su valor y efectividad.

VIII. Bibliografía

- Aguilar, A.A. (2015). Compostaje como tecnología para la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el manejo de residuos orgánicos, San Rafael, Heredia, Costa Rica. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional, Costa Rica].
- Aguirre, E., Cáceres, A y González, R. (2011). *Diseño de una planta de compostaje para la micro región centro y sur del departamento de Ahuachapán*. [Tesis de Bachillerato, Universidad de El Salvador].
<https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14956/1/%E2%80%9CDISE%C3%91O%20DE%20UNA%20PLANTA%20DE%20COMPOSTAJE%20PARA%20LA%20MICRO%20REGION%20CENTRO%20Y%20SUR%20DEL%20DEPARTAMENTO%20DE%20AHUACHA.pdf>
- Akratos, C.S., Tekerlekopoulou, A.G., Vasiliadou, I.A., & Vayenas, D.V., (2017). Co-composting of olive mill waste for the production of soil amendments. *Olive Mill Waste*. 161–182. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805314-0.00008-X>
- Alvarado, D.A. (2019). *Gestión de Proyectos de Construcción bajo una perspectiva de Economía Circular*. [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11159/gestion_proyectos_construccion_perspectiva_economia_circular.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anchía, D.L. (2018). *Propuesta para el diseño de micro-rutas de recolección de residuos sólidos valorizables en el casco central comercial de la ciudad de San José*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional, Costa Rica].
- Apaza, E., Mamani, F., y Sainz, H. (2015). Sistema de compostaje para el tratamiento de residuos de hoja de coca con la incorporación de tres activadores biológicos, en el centro experimental de Kallutaca. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 3(2).
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2308-38592015000200003&script=sci_arttext
- Arango, M.J. (2017). *Abonos orgánicos como alternativa para la conservación y mejoramiento de los suelos*. [Tesis de Bachillerato, Corporación Universitaria Lasallista, Colombia].
http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/2036/1/Abonos_organicos_alternativa_conservacion_mejoramiento_suelo.pdf

- Arce, A. (2021). *Estado de Situación PYME en Costa Rica 2021*. MEIC.
<http://reventazon.meic.go.cr/informacion/estudios/2021/pyme/DIGEPYME-INF-038-2021.pdf>
- Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente (ACEPESA). (2021). Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos del cantón de Turrialba 2021-2026.
<https://muniturrialba.go.cr/docs/reciclaje/PMGIRS%20Turrialba%20Web.pdf>
- Bohórquez, W. (2019). *El proceso de compostaje*. Ediciones Unisalle. Universidad de la Salle. Bogotá.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=libros>
- Cajahuanca, S.F. (2016). Optimización del manejo de residuos orgánicos por medio de la utilización de Microorganismos Eficientes (*Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus* sp., *Lactobacillus* sp.) en el proceso de compostaje en la central hidroeléctrica Chaglla. [Tesis de bachillerato, Universidad de Huánuco. Perú].
http://distancia.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/58/TESIS_SARA_CAJAHUANCA_FIGUEROA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Camacho, F. (2019). *Biofertilización orgánica de almacigos de café (Coffea arabica L.) con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor en la región de Monteverde, Costa Rica*. [Tesis de doctorado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica y Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica].
<https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/18921/Tesis%20BioFertilizacion%20de%20Almacigos%20de%20Caf%C3%A9%20V16012019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Casco, E. (2015). *Determinación de carbono y nitrógeno de los residuos orgánicos del distrito metropolitano de Quito, año 2014-2015*. [Tesis de Bachillerato, Universidad Internacional SEK, Ecuador].
<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1426/1/Determinaci%C3%B3n%20de%20carbono%20y%20nitr%C3%B3geno%20de%20los%20residuos%20org%C3%A1nicos%20del%20distrito%20metropolitano%20de%20quito.%20A%C3%Bl0%202014-2015.pdf>

- Casavilca, D. (2022). *Evaluación del conocimiento sobre compostaje de los trabajadores del mercadillo del distrito de Ascensión - Huancavelica, 2021*. [Tesis de Bachillerato, Universidad Continental, Perú]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12303/4/IV_FIN_107_TE_Casavilca_De_La_Cruz_2022.pdf
- Castro, L., Murillo, M., Uribe, L., y Mata, R. (2015). Inoculación al suelo con *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum oryzae*, *Bacillus subtilis* y microorganismos de montaña (MM) y su efecto sobre un sistema de rotación soya-tomate bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Costarricense*. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000300021
- Castro, F., Navarro, J., y Castro, L. (2023). Adición de Inóculos Microbianos y Condiciones Optimizadas de Elaboración en un Compost Comercial. *Agronomía Costarricense* 47(2). revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/download/56130/56846?inline=1
- Cao, Y., Wang, X., Bai, Z., Chadwick, D., Misselbrook, T., Sommer, S., Qin, W., & Ma, L. (2019). Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 235, 626-635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.288>
- Caucino, M. (2020). *El Club de Roma y los límites al crecimiento*. Infobae. <https://www.infobae.com/america/opinion/2020/04/05/el-club-de-roma-y-los-limites-al-crecimiento/>
- Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI). (2020). Borrador de Plan Municipal para la Gestión Integral de Residuos del cantón de Heredia 2020-2025. https://www.heredia.go.cr/sites/default/files/proyecto_de_pmgirs_municipalidad_heredia_periodo_2020-2025.pdf
- Chavarri, A., Ortiz, R., Larraona, J., y Bañales, F. (2005). *Manual práctico de técnicas de compostaje*. Abarrataldea. <https://www.abarrataldea.org/manualpdf.pdf>
- Cheng, C., Zhu, R., Thompson, R., & Zhang, L. (2021). Reliability analysis for multiple-stage solid waste management systems. *Waste Management*, 120, 650-658. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.035>

- Chi, J., San, S., Lung, Y., & Sien, C. (2023). Optimal Aeration Management Strategy for A Small-Scale Food Waste Composting. *Carbon Resources Conversion*. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.06.002>
- Concejalías de Agenda Urbana y Espacio Agrario y concejalía de Sostenibilidad. (s.f). Relación Carbono Nitrógeno (C/N) en los abonos orgánicos. Lérida, España. <https://urbanisme.paeria.es/sostenibilitat/fitxers/a21e/recursos/RelacioicalculCN.pdf>
- Condado de Klickitat. (s.f). Calculadora de mezcla de compost. Departamento de Residuos Sólidos. <https://www.klickitatcounty.org/DocumentCenter/View/3523/Compost-Calculator>
- Consejo Nacional Ambiental (Costa Rica). (2020). I Plan Nacional de Compostaje 2020-2050. Consejo Nacional Ambiental. https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/plan_nacional_de_compostaje_2020-2050.pdf
- Constitución Política de la República de Costa Rica. (2017). Comp. Vinicio Piedra Quesada – 1ª ed. – San José: Imprenta Nacional, 2017. https://www.imprentanacional.go.cr/editorialdigital/libros/textos%20juridicos/constitucion_politica_digital_edincr.pdf
- Contraloría General de la República. (2019). *Índice de Gestión Municipal. Resultados del período 2018*. <https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docsweb/documentos/publicaciones-cgr/igm/2018/igm-2018.pdf>
- Comisión GIR Pococí. (2017). Plan Municipal para la Gestión Integral de Residuos del cantón de Pococí (PMGIR-Pococí). *Municipalidad de Pococí*. <https://munipococi.go.cr/munipococi.go.cr/images/gestionmunicipal/GestionAmbient al/PMGIR%20de%20Pococi%202017-2022,%2006.09.2017.pdf>
- Corato, U. (2020). Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy. *Science of The Total Environment*, 738, 139840.
- Decreto N°37745-S. Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos

- Sólidos Ordinarios. Costa Rica, 19 de abril de 2013. *SCIJ*.
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=75341&nValor3=93371&strTipM=TC
- Decreto N°39760-S. Oficializa la Estrategia Nacional para la Separación, Recuperación y Valorización de Residuos. Costa Rica, 11 de mayo de 2016. *SCIJ*.
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=82186&nValor3=105110&strTipM=TC
- Decreto N°33477-S-MP. Declara de interés público y nacional, las iniciativas tendientes a brindar una solución integral al problema de los desechos. Costa Rica, 23 de noviembre de 2006. *SCIJ*.
https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=58908&nValor3=65551&strTipM=TC
- Decreto 506/2013. Sobre productos fertilizantes. Ministerio de la Presidencia de España, 10 de julio de 2013. boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-7540-consolidado.pdf
- Défaz, G.C., y Gualoto, H.A. (2020). *Evaluación de la eficiencia de tres activadores biológicos aplicados a pilas de compostaje ubicados en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma*. [Tesis de Bachillerato, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20668/1/CD%2010170.pdf>
- Dume, B., Hanca, A., Svehlaa, P., Michal, P., Demelash, A., & Nigussie, A. (2023). Composting and vermicomposting of sewage sludge at various C/N ratios: Technological feasibility and end-product quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115255. <https://doi.org/una.remotexs.co/10.1016/j.ecoenv.2023.115255>
- El-mrini, S., Aboutayeb, R., & Zouhri, A. (2022). Effect of initial C/N ratio and turning frequency on quality of final compost of turkey manure and olive pomace. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(37). <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00092-6>
- Environment Protection Authority (EPA). (2019). *Compost guideline*. South Australia. https://www.epa.sa.gov.au/files/7687_guide_compost.pdf
- Ermolaev, E., Sundberg, C., Pell, M., Smårs, S., & Jönsson, H. (2019). Effects of moisture on emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from food and garden

- waste composting. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118165. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118165>
- Fallas, D. (2016). *Caracterización del proceso de compostaje y aprovechamiento del calor generado en un reactor bajo de aireación forzada*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/05/Tesis-DiegoFallas.pdf>
- Feng, Y., Wang, G.Z., Liu, Y.W., Cheng, D.M., Fan, S.H., Zhao, Q.S., Xue, J., Zhang, S.Q., & Li, Z.J. (2021). The impacts of oxytetracycline on humification during manure composting can be alleviated by adjusting initial moisture contents as illustrated by NMR. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(8), 2277-2288. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63332-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63332-9)
- Fernández, G. (30 de septiembre de 2020). El problema de la gestión de los residuos sólidos en Costa Rica. *360 soluciones verdes*. <https://www.360-sv.com/blog/residuos>
- Fouguira, S., El Haji, M., Benhra, J., & Ammar, E. (2023). Optimization of olive oil extraction wastes co composting procedure based on bioprocessing parameters. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19645>
- García, F.P. (2018). *Calidad y tiempo de obtención del compost aplicando microorganismos eficientes en la Universidad Cesar Vallejo, filial-Chiclayo*. [Tesis de Licenciatura, Universidad César Vallejo, Perú]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/31497/Garica_PFJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Garita, N.S., y Rojas, J.V. (2015). *Guía práctica para el manejo de los residuos orgánicos utilizando composteras rotatorias y lombricompost* Guía práctica para el manejo de los residuos orgánicos utilizando composteras rotatorias y lombricompost. [https://www.documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/3818/Manual%20Composteras.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20son%20los%20residuos%20org%C3%A1nicos,materia%20org%C3%A1nica%20\(Mantra%202014\).](https://www.documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/3818/Manual%20Composteras.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20son%20los%20residuos%20org%C3%A1nicos,materia%20org%C3%A1nica%20(Mantra%202014).)
- Garrido, A. (2015). *Ingeniería básica de una planta de compostaje en túneles*. [Tesis de Bachillerato, Universidad de Sevilla]. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90483/fichero/TFGAidaGarrido.pdf>

- González, L., Félix, R., Sandoval, J., Escobedo, D., y Longoria, R. (2021). Caracterización de biofertilizantes utilizados en el valle agrícola de Guasave, Sinaloa, México. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v39/2395-8030-tl-39-e859.pdf>
- Gujer Innotec AG. (2023). *Volteador de compost TG 201*. [Figura]. [https://www.gujerinnotec.com/en/maschinen/tg-201-\(gb\).html](https://www.gujerinnotec.com/en/maschinen/tg-201-(gb).html)
- Hernández, S.R., Fernández C.C., y Baptista L.M. (2017). Metodología de la investigación. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Herrera, J., Rojas, J., y Anchía, D. (2016). Tasas de generación y caracterización de residuos sólidos ordinarios en cuatro municipios del área metropolitana de Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 57, 235-260. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/8902/10203>
- Hidalgo, H. (2023). Niveles de ventas en la tienda Turi en el sector Mamey de la ciudad de Babahoyo. (Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador). <http://190.15.129.146/bitstream/handle/49000/13716/E-UTB-FAFI-COM-000211.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Informe Estado de la Nación. (2019). *Gestión de los residuos sólidos en Costa Rica*. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2019. San José, Costa Rica. https://repositorio.conare.ac.cr/bitstream/handle/20.500.12337/7818/Soto_%202019_Gestion_Residuos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Instituto de Desarrollo Rural (INDER). (2015). *Plan de Desarrollo Rural Territorial de Pococí 2015-2022*. <https://www.inder.go.cr/pococi/PDRT-Pococi.pdf>
- Instituto Nacional de Aprendizaje (INA). (s.f). *Condiciones que promueven el compostaje*. [Presentación de PowerPoint]. INA. https://www.ina-pidte.ac.cr/pluginfile.php/36676/mod_resource/content/11/Tema%202.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). *Estadísticas Económicas de Total de empresas según Provincia, Cantón y Distrito 2012-2022*. <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/estadisticas-economicas?filtertext=empresas>
- Jerez, D., Delbuono, V., Such., T y Del Mármol, G. (2019). *Informe Potasio*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_especial_de_potasio_-_noviembre_2019.pdf

- Kaza, S., Yao, L., Bhada, T., & Van, W. (2018). What a Waste 2.0: What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *Urban Development; Washington, DC: World Bank*.
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Kumar, M., Ou, Y., & Lil, J. (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 30(4), 602-609.
<https://doi.org.una.remotexs.co/10.1016/j.wasman.2009.11.023>
- Langarica, A., Zafar, U., Heyworth, A., Brown, T., Fox, G., & Robson, G. (2014). Fungal succession in an in-vessel composting system characterized using 454 pyrosequencing. *FEMS Microbiology Ecology*, 88(2), 296-308.
<https://doi.org/10.1111/1574-6941.12293>
- Ley N°8839 de 2010. Para la Gestión Integral de Residuos. 13 de julio de 2010 (Costa Rica). SCIJ.
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=68300
- Lippel. (2023). *Tamiz Rotativa para Biomasa CLR 950x1500*. [Figura].
<https://www.lippel.com.br/tamices-rotativos/tamiz-rotativa-para-biomasa-clr-950x1500/?lng=es>
- Margaritis, M., Dimos, V., Malamis, D., & Loizidou, M. (2023). An experimental investigation of the composting process in an innovative home composting System: The influence of additives. *Cleaner Materials*, 8, 100185.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100185>
- Masís, K., y Abarca, L. (2019). Situación actual de los Centros Municipales de Recuperación de Residuos Valorizables (CRRV) en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 32(4), 3-17. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4785>
- Mellado, G. (2023). *Desarrollo de una Aplicación para el cálculo de la Relación Carbono-Nitrógeno de una masa compostable*. [Tesis de Bachillerato, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina]. http://ica.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/18984/busajm-mellado-gonzalo-tesis.pdf

- Méndez, P.C. (2019). *Evaluación de Microorganismos de Montaña MM como aceleradores de compostaje para la producción de cultivos aromáticos*. [Tesis de Bachillerato, Universidad de La Salle, Colombia].
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1057&context=biologia>
- Mercado, L; y Rivera, D. (2021). *Guía paso a paso para facilitar la transición hacia una economía circular desde los gobiernos locales: Caso de Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 125 p. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11166>
- Ming, F.T., Dat, T.B., Lang, M.T., Lim, M.K., & Hu, J. (2020). Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124132>
- Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador. (2020). *Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/07/MANUAL-DE-APROVECHAMIENTO-DE-RESIDUOS-ORGANICOS-MUNICIPAL.pdf>
- Ministerio de Salud. (2016a). Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021. San José, Costa Rica.
<https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-dearchivos/3025-plan-nacional-para-la-gestion-integral-de-residuos-2016-2021>
- Ministerio de Salud. (2016b). Estrategia Nacional para la Separación, Recuperación y Valorización de Residuos. San José, Costa Rica.
<https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/3026estrategia-nacional-de-reciclaje-2016-2021>
- Montero Ramírez, S. (2019). *Eficacia de los microorganismos eficientes en la elaboración de compost con materia orgánica generada en los mercadillos de Cayhuayna, distrito de Pillco Marca, departamento de Huánuco*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Huánuco, Perú].
<http://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1680/MONTERO%20RAMIREZ%2c%20%20Sally%20Yasmine.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G., Alaerts, L., Acker, K., Meester, S., & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 452-461.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134491930151X>

Moreno, N., Agudelo, D., y Vega, L. (2019). *Sistema de aprovechamiento de los lixiviados en el proceso de compostaje del “Área de Transformación y Aprovechamiento de Residuos Vegetales y Energías Renovables” del Jardín Botánico José Celestino Mutis.*

<https://jbb.gov.co/documentos/tecnica/2019/sistema-aprovechamiento-lixiviados-3.pdf>

Moreto, N.M y Delgado, J.S. (2019). Compostaje de residuos sólidos orgánicos utilizando microorganismos eficientes en el distrito de Cacatachi. [Tesis de Licenciatura, Universidad Peruana Unión].

https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1777/Areli_Tesis_Licenciatura_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Moubareck, C., Alawlaqia, B., & Alhajeri, S. (2023). Characterization of physicochemical parameters and bacterial diversity of composted organic food wastes in Dubai. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16426>

Mula, J. (2012). *Relación Carbono-Nitrógeno en el compost.* Agromática. <https://www.agromatica.es/relacion-cn-en-el-compost/>

Municipalidad de Pérez Zeledón (2022). *Guía de buenas prácticas municipales para la instalación y operación de plantas de compostaje.* https://www.repic.ch/wp-content/uploads/2022/09/2019_05_AnnexE_Good-practices-in-the-implementation-of-composting-plants.pdf

Murillo, J. (s.f). Métodos de investigación de enfoque experimental. https://www.postgradoune.edu.pe/pdf/documentos_academicos/ciencias-de-laeducacion/10.pdf

Nandini, D., Kumari, K., Srivatsava, M., & Dalai, N. (2020). A review on various techniques for municipality waste management & product development. *Materialstoday: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.747>

Nie, E., Zheng, G., Shao, Z., Yang, J., & Chen, T. (2018). Emission characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds produced during municipal solid waste composting. *Waste Management*, 79, 188-195. [https://www-sciencedirectcom.una.idm.oclc.org/science/article/pii/S0956053X1830446X](https://www.sciencedirect.com/una.idm.oclc.org/science/article/pii/S0956053X1830446X)

- NCh2880 (Norma Chilena de Compost). (2004). Norma Chilena Oficial. Compost-Clasificación y requisitos. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile. https://miros.cl/wp-content/uploads/2020/01/NCh_2880_Compost_Clasificaci%C3%B3n.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2012). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo: Alcance, causas y prevención*. <https://www.fao.org/3/i2697s/i2697s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias de América Latina*. <http://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). Compostaje: vamos a devolver algo al suelo. *FAO*. <http://www.fao.org/soils-2015/news/newsdetail/es/c/281085/#:~:text=El%20compostaje%20es%20el%20proceso,los%20micro organismos%2C%20en%20condiciones%20controladas>.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (2020). *Environment at a Glance 2020*. OCDE. <https://doi.org/10.1787/4ea7d35f-en>
- Pandey, P., Cao, W., Biswas, S., & Vaddella, V. (2016). A new closed loop heating system for composting of green and food wastes. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1252-1259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.114>
- Peng, L., Tang, R., Wang, G., Ma, R., Li, Y., Li, G., & Yuan, J. (2023). Effect of aeration rate, aeration pattern, and turning frequency on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Environmental Technology & Innovation*, 29, 102997. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102997>
- Peng, W., Gao, Y., Zhao, S., Xiang, P., Cai, X., & Yue, T. (2022). Thermophilic semi-continuous composting of kitchen waste: Performance evaluation and microbial community characteristics. *Bioresource Technology*, 363, 127952. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127952>
- Pérez, F. (2018). *Calidad y tiempo de obtención del compost aplicando microorganismos eficientes en la Universidad César Vallejo, Filial-Chiclayo*. [Tesis de Bachillerato, Universidad César Vallejo, Perú].

- Pinha, A.H., & Sawaga, J.K. (2020). A system dynamic modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122350. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122350>
- Programa Competitividad y Medio Ambiente (CYMA). (2012). Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios. San José, Costa Rica: Ministerio de Salud. http://www.cegesti.org/manuales/download_manual_generacion_composicion_residuos/manual_generacion_composicion_residuos.pdf
- Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible de la Universidad de Costa Rica (ProDUS-UCR). (2016). *Gestión de los residuos sólidos en Costa Rica*. Informe XXII - Estado de la Nación.
- Quiñones, H., Trejo, W., & Juscamaita, J. (2016). Evaluación de la calidad de un abono líquido producido vía fermentación homoláctica de heces de alpaca. *Ecología Aplicada*, 15(2), 1726-2216. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.753>
- Rastogi, M., Nandal, M., & Khosla, B. (2020). Microbes as vital additives for solid waste composting. *Heliyon*, 6. [https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440\(20\)30188-2.pdf](https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(20)30188-2.pdf)
- Rivas, M., y Silva, R. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia Crassipes*). *Revista Ciencia UNEMI*, 13(32), 87-100. <https://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/1007/1015>
- Röben, E. (2002). Manual de Compostaje Para Municipios. <http://www.resol.com.br/Cartilha7/ManualCompostajeparaMunicipios.pdf>
- Rodríguez, L.R. (2020). *Retos y oportunidades para la valorización de residuos sólidos en Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11464/TFG_Rosibel_Rodr%c3%adguez_Leandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Romano, G., & Molinos, M. (2020). Factors affecting eco-efficiency of municipal waste services in Tuscan municipalities: An empirical investigation of different management models. *Waste Management*, 105, 384-394.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.028>

Rudín, V., Soto, S., y Linnenberg, C. (2019). Elaboración de la propuesta de proyecto a financiar para una NAMA de residuos sólidos en Costa Rica. *GFA Consulting Group*.

Sánchez, E.V., y Dominguez, A.M. (2020). *Producción de Compost a base de Residuos orgánicos domiciliarios de Bello Horizonte con la Incorporación de Microorganismos Eficientes, Banda de Shilcayo, 2020*. [Tesis de Licenciatura, Universidad César Vallejo, Perú].
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/64181/Sanchez_VE-Dominguez_AME-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sampieri, H., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). Selección de la muestra. *Metodología de la Investigación*. (6ª ed., p.170-191). México: McGraw-Hill.
http://metabase.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/2776/506_6.pdf

Secretaría Técnica de los ODS en Costa Rica. (2020). Segundo Informe Nacional Voluntario sobre Objetivos de Desarrollo Sostenible en Costa Rica. MIDEPLAN.
https://documentos.mideplan.go.cr/share/s/KnmDPk5cT76rag_g2JclZw

Segura, A.M., Rojas, L.A., y Pulido, Y.A. (2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. *Revista Espacios*, 41(17).
<https://www.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p22.pdf>

Sepúlveda, L., y Alvarado, J. (2013). Manual de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos a través de Sistemas de Compostaje y Lombricultura en el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Residuos_solidos/Cartillas/Manual%20de%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20Organicos.pdf

Showket, I.M., Singh, P.C., & Pal. C.C. (2021). Implementation analysis of solid waste management in Ludhiana city of Punjab. *Environmental Challenges*, 2, 100023.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100023>

Sierra, F., Lesmes, C., y Acosta, P. (2020). *Prueba de puño para contenido de humedad*. [Figura]. Medio Ambiente y Sostenibilidad con la Mira en los ODS, Universidad Santo Tomás. *Research Gate*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Prueba-de-puno-para-contenido-de-humedad_fig6_349251212

- Solís, A. (2017). *Análisis de Flujo de Materiales de los Residuos Sólidos del distrito de Guápiles*. [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9876/analisis_flujo_materiales_residuos_solidos_distrito_guapiles.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Solís, A., y Abarca, L. (2021). Análisis de flujo de materiales de los residuos sólidos del distrito de Guápiles. *Tecnología en Marcha*, 34(4). https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822021000400063&script=sci_arttext
- Soobhany, N. (2018). Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1979-1988. <https://www.sciencedirect.com/una.idm.oclc.org/science/article/pii/S2213343718301210>
- Soto, S. (2019). *Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2019: Gestión de los residuos sólidos en Costa Rica*. https://repositorio.conare.ac.cr/bitstream/handle/20.500.12337/7818/Soto_%202019_Gestion_Residuos.pdf
- Suárez, A., Artigas, G., Miranda, R., y Sira, S. (2017). Sistema logístico para el desarrollo tecnológico de una planta de compostaje en la Universidad de Carabobo. *Ingeniería y Sociedad*, 12(1), 1856-352X. <http://bdigital2.ula.ve:8080/xmlui/bitstream/handle/654321/4313/art05.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tavakol, E., Jákli, B., Cakmak, I., Dittert, K., Karlovsky, P., Pfohl, P., & Senbayram, M. (2018). Optimized potassium nutrition improves plant-water-relations of barley under PEG-induced osmotic stress. *Plant and Soil*, 430(1-2), 23-35. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3704-8>
- Tong, Y.D., Xuan, T.D., & Dung, T.K. (2021). Understanding the role of informal sector for sustainable development of municipal solid waste management system: A case study in Vietnam. *Waste Management*, 124, 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.033>
- Turcott, E.C., Olay, E.R., Hernández, M.B., López, A.M., Mañón, M.S., & L, A. (2021). Assessment of some governance aspects in waste management systems: A case study

- in Mexican municipalities. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123320.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123320>
- Universidad de Cornell. (1996). *Calculate C/N Ratio for Three Materials*.
<https://compost.css.cornell.edu/calc/2.html>
- Vargas, A.M. (2021). *Optimización de mecanismos de aireación para la producción de compost a partir de residuos orgánicos municipales*. [Tesis de Bachillerato, Universidad Científica del Sur: Perú].
<https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1703/TB-Vargas%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas, C. (2017). *Calidad del compost producido a partir de residuos sólidos orgánicos municipales en el centro de protección ambiental “Santa Cruz”, ciudad de Concepción*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4145/Ytavclerh%20Vargas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vásquez, I.H. (2016). *Tipos de estudio y métodos de investigación*.
<https://nodo.ugto.mx/wpcontent/uploads/2016/05/Tipos-de-estudio-y-m%C3%A9todos-de-investigaci%C3%B3n.pdf>
- Vaverková, M., Adamcová, D., Winkler, J., Koda, E., Petrželová, L., & Maxianová, A. (2020). Alternative method of composting on a reclaimed municipal waste landfill in accordance with the circular economy: Benefits and risks. *Science of The Total Environment*, 723, 137971.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720314844>
- Vedova y Obando Forestal (V&O Forestal). (2023). *Trituradoras GMT*. [Figura].
<https://www.vyoforestal.com/categoria/trituradoras/>
- Vega, J., y Gutiérrez, K. (2021). *Portafolio de Acciones de Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a Escala Cantonal de Costa Rica*. Programa País Carbono Neutralidad. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/08/MRV-gestion-residuos.pdf>
- Xie, S., Tran, H., Pu, M., & Zhang, T. (2023). Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of agricultural organic waste:

- Research trends. *Materials Science for Energy Technologies*, 6, 331-342.
<https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.02.006>
- Xie, Y., Zhou, L., Dai, J., Chen, J., Yang, X., Wang, X., Wang, Z., & Fing, L. (2022). Effects of the C/N ratio on the microbial community and lignocellulose degradation, during branch waste composting. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 45, 1163–1174.
<https://doi.org/10.1007/s00449-022-02732-w>
- Young, H., Heon, S., Shim, J., & Jin, S. (2020). Composting Process and Gas Emissions during Food Waste Composting under the Effect of Different Additives. *Sustainability* 2020, 12, 7811; [doi:10.3390/su12187811](https://doi.org/10.3390/su12187811)
- Yugsi, I. (2011). *Elaboración y Uso de Abonos Orgánicos*. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Ecuador.
<https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/95/1/iniapsc300cd.pdf>
- Zambrano, M., y Mera, C. (2023). Contenido nutricional del compost a partir de residuos agropecuarios en la ESPAM MFL. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí. https://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/2086/1/TIC_IA40D.pdf
- Zeballos, M.F. (2017). *Caracterización de microorganismos de montaña (MM) en biofertilizantes artesanales*. [Tesis de Licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana].
<https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/6199/1/IAD-2017-049.pdf>
- Zeller, V., Towa, E., Degrez, M., & Achten, W. (2019). Urban waste flows and their potential for a circular economy model at city-region level. *Waste Management*, 83, 83-94.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.034>
- Zhang, L., & Sun, X. (2016). Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, 48, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.032>
- Zhong, H., Kim, Y. N., Smith, C., Robinson, B., & Dickinson, N. (2017). Seabird guano and phosphorus fractionation in a rhizosphere with earthworms. *Applied Soil Ecology*, 120, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.006>
- Zink, R. (2022). *Diseño de una planta industrial de compostaje de pilas estáticas aireadas con recuperación de calor*. [Tesis de Bachillerato, Universidad de Chile].

<https://mail.google.com/mail/u/2/#inbox/FMfcgzGwHpbbsWFkmqlNnvWgZJzMZg>
[CR](#)

IX. Anexos

Anexo 1. Cronograma de actividades

Objetivo	Actividades	Año																					
		2021										2022				2023							
		Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abr-Dic	Ene-May	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
Elaboración del anteproyecto	Presentación del tema																						
	Avance I																						
	Avance II																						
	Avance III																						

Viáticos		€237 500,00		€237 500,00
Internet móvil		€9 000,00		€9 000,00
Subtotal				€387 290,00
Equipamiento y materiales				
Adecuaciones de infraestructura o instalaciones			€150 000,00	€150 000,00
Equipo técnico científico		€520 942,80		€520 942,80
Materiales e insumos			€726 447,00	€726 447,00
Equipo de cómputo y materiales de oficina		€327 420,09		€327 420,09
Subtotal				€1 724 809,89
Total de costos directos				
COSTOS INDIRECTOS				
Asesoría, seguimiento y evaluación				
Tutora y lectores del PFG		€831 640,42	€341 303,62	€1 172 944,03
Consultas a expertos		€196 134,72		€196 134,72
Evaluadores académicos (tribunal)		€102 153,50		€102 153,50
Filóloga		€100 000,00		€100 000,00
Subtotal				€1 571 232,25
Personal				
Póliza		€1 000 000,00		€1 000 000,00
Subtotal				€1 000 000,00
Servicios públicos e infocomunicaciones				
Internet fijo		€252 000,00		€252 000,00
Electricidad		€100 632,00		€100 632,00
Agua			€8 070,00	€8 070,00
Subtotal				€1 360 702,00
Total de costos indirectos				
Total sin imprevistos				
Imprevistos	10% del subtotal de costos directos			€499 576,63
Gran total		€1 110 842,09	€4 255 425,57	€2 552 230,88
Aporte relativo		14%	54%	32%
				100%

Anexo 3. Frecuencia y distribución sectorial del servicio de recolección de residuos municipal del distrito de Guápiles

Día	Sectores
Lunes	Coopevigua 1, Barrio Los Maderos y La Ardillita, El Cuadrante, ASEMBIS, Barrio Santa Cecilia, La Regional y Calle Almendros, y Guápiles centro con Calle Fruta Pan, Calle Más x Menos y Calle INS
Martes	Barrio Pinares, Calle Vargas, Santa Clara y Hotel Talamanca, y Guápiles centro con Calles Aeropuerto, Calle Camino al Cielo y Calle Jardín.
Miércoles	Coopevigua 2 y 3, Convoy, Hogar de Ancianos. Los Doctores, La Trocha, Campos verdes, Barrio Doctores, Bloquera Paniagua, Pista 32, La Urba, Barrio Sinaí, Los Ángeles, Llamas del Bosque, La Emilia, Barrio Los

	Diamantes, Polideportivo-Barrio Nájera y Guápiles centro con U Latina-Registro Civil hasta Hotel Talamanca.
Jueves	Tribunales, Sector Nuevo Guápiles, La Expo-Pococí Limpio y Guápiles centro con atención de supermercados.
Viernes	Toro Amarillo, Bovinos, Calle Tractor, Barrio Las Brisas, Calle Estándar, Barrio Jesús, Barrio Garabito, y Guápiles centro.
Sábado	Guápiles centro.

Nota. Adaptado de *Plan Municipal para la Gestión Integral de Residuos del cantón de Pococí 2017-2022* (p.15), por la Comisión GIR Pococí, 2017.

Anexo 4. Encuesta para el sector residencial



Municipalidad de Pococí, Limón, Costa Rica.

Encuesta sobre el manejo de los residuos orgánicos en el sector residencial del distrito de Guápiles.



El propósito de esta encuesta es obtener información sobre la gestión de los residuos orgánicos en el sector comercial del distrito de Guápiles, Pococí, con el fin de conocer la situación actual sobre el manejo de estos residuos y utilizar los datos recopilados para el desarrollo de una propuesta para su tratamiento por parte de la Municipalidad de Pococí. Esta consulta forma parte de un proyecto de graduación de licenciatura de la Universidad Nacional, por tanto, la información brindada es confidencial y será utilizada para fines académicos.

Para más información puede contactarnos por los siguientes medios:

Correo: ambiental@munipococi.go.cr

Número: (+506) 2710-6600

Fecha: ____/____/____

Nombre de la persona encuestadora: _____

Sección 1. Datos generales de la vivienda.

Complete la información solicitada.

1. Lugar de residencia: _____
2. Número de personas que viven en el hogar: _____
3. Edad de la persona entrevistada: _____
4. Número de la vivienda: _____
5. Código de la muestra _____

Sección 2. Manejo de los residuos orgánicos.

Marque con una X y complete la información solicitada.

6. ¿Cómo considera el servicio de recolección que ofrece la Municipalidad?

- | | | |
|---|--------------------------|-------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | Deficiente. |
| 2 | <input type="checkbox"/> | Regular. |
| 3 | <input type="checkbox"/> | Aceptable. |

- 4 Bueno.
- 5 Excelente.

7. ¿Qué día y a qué hora disponen los residuos de la vivienda para la recolección por parte del camión recolector? (Indique la hora en el espacio disponible).

- 1 Lunes _____
- 2 Martes _____
- 3 Miércoles _____
- 4 Jueves _____
- 5 Viernes _____
- 6 Sábado _____

8. ¿Dónde coloca las bolsas de basura para su recolección por parte del camión municipal? (Opción única).

- 1 En una canasta propia.
- 2 En la acera frente a la casa.
- 3 En una acera de uso común cerca de la casa.
- 4 En un estañón o recipiente frente de la casa.
- 5 En un estañón o recipiente en un sitio común en la entrada de su barrio.
- 6 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

9. ¿En su vivienda separan los residuos ordinarios? Tales como: plástico, papel, cartón, vidrio, aluminio, tetrapak u otros. (Opción única).

Siempre: Todos los días.

Frecuentemente: 5-6 veces por semana.

Ocasionalmente: 3-4 veces por semana.

Casi nunca: 1-2 veces por semana.

Nunca: Ningún día.

- 1 Siempre.
- 2 Frecuentemente.
- 3 Ocasionalmente.
- 4 Casi nunca.
- 5 Nunca.

10. ¿Qué tipo de residuos orgánicos se generan en mayor cantidad en la vivienda? (Opciones múltiples).

- 1 Cáscaras de frutas y verduras.
- 2 Zacate y podas de jardín.
- 3 Restos de comida cocinada.
- 4 Sobras de pan o tortillas.
- 5 Cáscaras de huevos.
- 6 Restos de carne y huesos sin cocinar.
- 7 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

11. ¿Qué manejo les dan a los **residuos orgánicos** en el hogar? (Opciones múltiples).

- 1 Se separan y entierran.
- 2 No tienen un manejo diferente, se colocan con los residuos ordinarios para su recolección.
- 3 Se queman junto a otro tipo de residuos.
- 4 Se hace abono con ellos mediante un método de compostaje. Indicar el método _____
- 5 Se colocan directamente en las raíces de plantas o árboles dentro de la propiedad.
- 6 Se depositan en un terreno fuera de la propiedad (lote baldío).
- 7 Se utilizan para alimentar animales.
- 8 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

12. ¿Qué manejo le dan en la vivienda a los residuos de jardín (zacate, hojas, ramas, plantas)? (Opciones múltiples).

- 1 Se disponen en un terreno baldío o botadero.

- 2 Se separan para que se los lleve el camión municipal.
- 3 Se aprovechan como abono.
- 4 Se queman.
- 5 No se generan residuos de jardín.
- 6 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

Sección 3. Capacitación e interés en el tema de compostaje.

Marque con una X y complete la información solicitada.

13. ¿Ha recibido usted capacitación sobre separación de residuos y reciclaje?

- 1 Sí. Indicar por parte de quién: _____
- 2 No.
- 3 No sabe / no responde.

14. ¿Ha recibido usted capacitación e información sobre el aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de abono a partir de métodos de compostaje?

- 1 Sí. Indicar por parte de quién: _____ (Pasar a la pregunta 14).
- 2 No. (Pasar a la pregunta 15).
- 3 No sabe/ No responde

15. Indique en el siguiente espacio el o los métodos de compostaje que conoce:

16. ¿Estaría dispuesto(a) a recibir una capacitación en el tema de aprovechamiento de residuos orgánicos para elaboración abono? Con el fin de aprender su importancia, cómo se hace, entre otros.

- 1 Sí.
- 2 No. ¿Alguna razón en especial? _____
- 3 No sabe / No responde.

17. Estaría usted dispuesta/o en realizar la separación de los residuos orgánicos como (cáscaras de frutas y verduras, restos de comida, etc.) y entregarlos a un ente autorizado para su recolección?

- Sí.
- No. ¿Alguna razón en especial? _____
- No sabe / No responde.

18. ¿Apoyaría usted un proyecto de tratamiento de residuos orgánicos propuesto por la Municipalidad?

- 1 Sí.
- 2 No. ¿Alguna razón en especial? _____
- 3 No sabe / No responde.

Observaciones: _____

Nota. Adaptado de la guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios, por el Programa de Competitividad y Medio Ambiente [CYMA], 2012.

Anexo 5. Encuesta para el sector comercial



Municipalidad de Pococí, Limón, Costa Rica.

Encuesta sobre el manejo de los residuos orgánicos en el sector comercial del distrito de Guápiles.



El propósito de esta encuesta es obtener información sobre la gestión de los residuos orgánicos en el sector comercial del distrito de Guápiles, Pococí, con el fin de conocer la situación actual sobre el manejo de estos residuos y utilizar los datos recopilados para el desarrollo de una propuesta para su tratamiento por parte de la Municipalidad de Pococí. Esta consulta forma parte de un proyecto de graduación de licenciatura de la Universidad Nacional, por tanto, la información brindada es confidencial y será utilizada para fines académicos.

Para más información puede contactarnos por los siguientes medios:

Correo: ambiental@munipococi.go.cr

Número: (+506) 2710-6600

Fecha: ____/____/____

Nombre de la persona encuestadora: _____

Puesto de la persona encuestada (dependiente, dueño, otro): _____

Número del comercio: _____

Sección 1. Datos generales del comercio.

Complete la información solicitada.

19. Nombre del comercio: _____

20. Tipo de comercio: _____

21. Ubicación del comercio: _____

22. Cantidad aproximada de clientes que atienden diariamente: _____

23. Código de la muestra _____

24. ¿Cuál es la cantidad de personal?

- | | | |
|---|--------------------------|-------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | 1-5. |
| 2 | <input type="checkbox"/> | 6-30. |
| 3 | <input type="checkbox"/> | 31 a 100. |
| 4 | <input type="checkbox"/> | Más de 100. |

25. ¿Cuántos días a la semana permanece abierto el comercio y cuál es el horario?

- | | | |
|---|--------------------------|----------------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | Lunes a viernes_____ |
| 2 | <input type="checkbox"/> | Sábados_____ |
| 3 | <input type="checkbox"/> | Domingos _____ |
| 4 | <input type="checkbox"/> | Otro _____ |

Sección 2. Manejo de los residuos orgánicos.

Marque con una X y complete la información solicitada.

26. ¿Cómo considera el servicio de recolección que ofrece la Municipalidad?

- | | | |
|---|--------------------------|-------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | Deficiente. |
| 2 | <input type="checkbox"/> | Regular. |
| 3 | <input type="checkbox"/> | Aceptable. |
| 4 | <input type="checkbox"/> | Bueno. |
| 5 | <input type="checkbox"/> | Excelente. |

27. ¿Qué día y a qué hora disponen los residuos de su comercio para su recolección por parte del camión recolector? (Indicar la hora en el espacio disponible).

- | | | |
|---|--------------------------|----------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | Lunes_____ |
| 2 | <input type="checkbox"/> | Martes_____ |
| 3 | <input type="checkbox"/> | Miércoles_____ |
| 4 | <input type="checkbox"/> | Jueves_____ |
| 5 | <input type="checkbox"/> | Viernes_____ |
| 6 | <input type="checkbox"/> | Sábado_____ |

28. ¿Dónde coloca las bolsas de basura para su recolección por parte del camión municipal? (Opción única).

- | | | |
|---|--------------------------|------------------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | En una canasta propia. |
|---|--------------------------|------------------------|

- 2 En la acera frente al comercio.
- 3 En una acera de uso común cerca del comercio.
- 4 En un estañón o recipiente frente al comercio.
- 5 En un estañón o recipiente en un sitio de uso común cercano al negocio.
- 6 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

29. ¿En el comercio separan los residuos ordinarios? Tales como: plástico, papel, cartón, vidrio, aluminio, tetrapak u otros. (Opción única).

Siempre: Todos los días.

Frecuentemente: 5-6 veces por semana.

Ocasionalmente: 3-4 veces por semana.

Casi nunca: 1-2 veces por semana.

Nunca: Ningún día.

- 1 Siempre.
- 2 Frecuentemente.
- 3 Ocasionalmente.
- 4 Casi nunca.
- 5 Nunca.

30. ¿Qué tipo de residuos orgánicos se generan en mayor cantidad en el comercio? (Opciones múltiples).

- 1 Cáscaras de frutas y verduras.
- 2 Restos de comida cocinada.
- 3 Sobras de pan o tortillas.
- 4 Cáscaras de huevos.
- 5 Restos de carne y huesos sin cocinar.
- 6 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

31. ¿Qué manejo les dan a los **residuos orgánicos** en el comercio? (Opciones múltiples).

- 1 No tienen un manejo diferente, se colocan con los residuos ordinarios para su recolección.
- 2 Se separan para alimentar animales.
- 3 Se hace abono con ellos mediante un método de compostaje. Indicar el método _____
- 4 Se colocan directamente en las raíces de plantas o árboles dentro de la propiedad del local.
- 5 Se depositan en un terreno fuera de la propiedad del local (lote baldío).
- 6 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

32. ¿Qué manejo le dan en su comercio a los residuos de jardín (zacate, hojas, ramas, plantas)? (Opciones múltiples).

- 1 Se disponen en un terreno baldío o botadero.
- 2 No se generan residuos de jardín.
- 3 Se separan para que se los lleve el camión municipal.
- 4 Se aprovechan como abono.
- 5 Se queman.
- 6 Otro. Especificar en el siguiente espacio: _____

Sección 3. Capacitación e interés en el tema de compostaje.

Marque con una X y complete la información solicitada.

33. ¿Ha recibido usted capacitación e información sobre el aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de abono a partir de métodos de compostaje?

- 1 Sí. Indicar por parte de quién: _____ (Pasar a la pregunta 9).
- 2 No. (Pasar a la pregunta 10).
- 3 No sabe / No responde

34. Indique en el siguiente espacio el o los métodos de compostaje que conoce:

35. ¿Estaría interesado el comercio en realizar la separación de los residuos orgánicos como (cáscaras de frutas y verduras, restos de comida, etc.) y darlos a un ente autorizado que recoja este tipo de residuos?

- 1 Sí.
- 2 No. ¿Alguna razón en especial? _____
- 3 No sabe / No responde.

36. ¿Apoyaría el comercio un proyecto que realice la Municipalidad en cuanto al manejo de los residuos orgánicos?

- 1 Sí.
- 2 No. ¿Alguna razón en especial? _____
- 3 No sabe / No responde.

Observaciones: _____

Nota. Adaptado de la *guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios*, por el Programa de Competitividad y Medio Ambiente [CYMA], 2012.

Anexo 6. Panfleto informativo para viviendas y comercios

Instrucciones para la recolección

Unidad Técnica de Gestión Ambiental

Si tiene alguna duda contáctenos a través de los siguientes medios.



1

El estudio de generación de residuos orgánicos se llevará a cabo en el distrito de Guápiles durante 7 días del mes de octubre, de los cuales se recogerán los residuos una sola vez en cada comercio y vivienda seleccionada.

2

La recolección se realizará por un camión de la municipalidad únicamente en las viviendas y comercios seleccionados.

3

Se deben colocar los residuos en las bolsas y recipientes previamente entregados por el personal y colaboradores identificados de la municipalidad.



(+506) 2710-6600



ambiental@municipococi.go.cr

Estudio de Generación de Residuos Orgánicos

Municipalidad de Pococi
Unidad Técnica de Gestión Ambiental



Información importante

¿Sabía usted que aproximadamente el 58% de los residuos que se generan en el cantón corresponden a residuos orgánicos?

Este tipo de residuos pueden generar diversos problemas ambientales si no son gestionados adecuadamente, como malos olores, emisiones desmedidas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), propagación de moscas y roedores, entre otros.

Ante esta problemática, la Municipalidad de Pococi iniciará con un proyecto de elaboración de abono a partir de los residuos orgánicos generados en viviendas y comercios, iniciando con el distrito de Guápiles. Como parte del proyecto es necesario realizar un estudio de generación para conocer la cantidad que se está generando de estos residuos.

¡Su colaboración es muy importante para el mejoramiento de las condiciones ambientales de nuestro cantón!



Lo que debe separar

Los residuos que debe incluir en las bolsas:

- Cáscaras de frutas y verduras.
- Bolsas de té.
- Restos de pan y tortillas.
- Cáscaras de huevo.
- Bosorola y filtros de café.
- Aserrín.
- Restos de jardín (zacate, hojas, ramas pequeñas, raíces, etc.).
- Servilletas y toallas de cocina.
- Restos de comida cocinada.
- Cáscaras y restos de legumbres.
- Ceniza y carbón.
- Granos y semillas.
- Huesos cocinados.
- Pescado y mariscos cocinados.
- Queso, kéfir y otros lácteos.



Lo que no debe separar

Los residuos que no debe incluir en las bolsas:

- Carnes crudas.
- Papel sanitario.
- Excretas de animales.
- Líquidos como caldos, jugos, etc.
- Madera tratada químicamente.
- Residuos ordinarios como: plástico, vidrio, papel, cartón, aluminio, tetrapak, entre otros.
- Colillas de cigarro.
- Cuerdas y mecates sintéticos.
- Goma de mascar (chicles).
- Pañales.
- Toallas sanitarias.
- Toallitas húmedas.
- Mascarillas o guantes.
- Pinturas.
- Telas sintéticas.

Anexo 7. Etiqueta para la identificación de las viviendas a muestrear



Anexo 8. Etiqueta para la identificación de los comercios a muestrear



Anexo 9. Peso total de los residuos orgánicos, número de personas y generación per cápita (GPC) de cada vivienda muestreada durante la semana del estudio

Código	Personas por hogar	Cantidad (kg)	GPC (kg/hab*d)	Código	Personas por hogar	Cantidad (kg)	GPC (kg/hab*d)
H1	7	2,20	0,04	H41	4	6,10	0,22
H2	5	3,97	0,11	H42	3	5,70	0,27
H3	6	5,60	0,13	H43	1	1,30	0,19
H4	2	10,70	0,76	H44	4	5,10	0,18
H5	5	2,70	0,08	H45	6	15,10	0,36
H6	5	6,60	0,19	H46	4	9,50	0,34
H7	3	3,10	0,15	H47	2	12,00	0,86
H8	5	6,60	0,19	H48	2	9,45	0,68
H9	3	3,50	0,17	H49	3	1,50	0,07
H10	4	8,40	0,30	H50	1	6,10	0,87
H11	2	4,20	0,30	H51	5	10,90	0,31
H12	2	0,80	0,06	H52	4	4,50	0,16
H13	5	8,90	0,25	H53	2	1,50	0,11
H14	2	10,90	0,78	H54	2	1,70	0,12
H15	2	3,00	0,21	H55	3	2,90	0,14
H16	5	14,80	0,42	H56	3	5,80	0,28
H17	4	12,30	0,44	H57	2	5,00	0,36
H18	3	4,10	0,20	H58	2	1,80	0,13
H19	3	5,30	0,25	H59	2	12,10	0,86
H20	3	4,00	0,19	H60	5	6,70	0,19
H21	4	7,60	0,27	H61	2	2,60	0,19
H22	3	3,00	0,14	H62	4	4,60	0,16
H23	2	13,60	0,97	H63	4	5,10	0,18
H24	6	8,70	0,21	H64	3	4,70	0,22
H25	2	1,90	0,14	H65	7	2,00	0,04
H26	3	4,40	0,21	H66	5	9,30	0,27
H27	2	5,10	0,36	H67	2	2,30	0,16
H28	5	1,00	0,03	H68	3	8,10	0,39
H29	1	3,20	0,46	H69	4	4,90	0,18
H30	3	5,90	0,28	H70	4	6,10	0,22
H31	5	5,70	0,16	H71	1	1,10	0,16
H32	3	3,40	0,16	H72	1	5,80	0,83
H33	5	7,10	0,20	H73	3	7,70	0,37
H34	2	1,50	0,11	H74	2	3,40	0,24
H35	2	11,10	0,79	H75	3	5,50	0,26
H36	2	6,60	0,47	H76	3	3,80	0,18
H37	2	1,20	0,09	H77	2	3,80	0,27
H38	5	3,90	0,11	H78	3	2,80	0,13

Código	Personas por hogar	Cantidad (kg)	GPC (kg/hab*d)	Código	Personas por hogar	Cantidad (kg)	GPC (kg/hab*d)
H39	2	3,10	0,22	H79	5	7,30	0,21
H40	2	4,10	0,29	H80	5	5,80	0,17
H81	2	3,00	0,21	H124	2	11,00	0,79
H82	5	2,80	0,08	H125	2	3,40	0,24
H83	6	4,50	0,11	H126	4	5,80	0,21
H84	2	4,10	0,29	H127	1	0,90	0,13
H85	4	2,70	0,10	H128	6	4,80	0,11
H86	1	2,80	0,40	H129	4	7,80	0,28
H87	3	2,50	0,12	H130	2	8,80	0,63
H88	4	8,80	0,31	H131	4	1,30	0,05
H89	4	15,80	0,56	H132	2	3,00	0,21
H90	3	5,20	0,25	H133	7	8,10	0,17
H91	3	13,10	0,62	H134	3	7,00	0,33
H92	3	11,40	0,54	H135	3	4,60	0,22
H93	2	9,10	0,65	H136	3	8,70	0,41
H94	3	2,30	0,11	H137	3	14,40	0,69
H95	3	8,40	0,40	H138	3	6,60	0,31
H96	1	3,40	0,49	H139	3	2,50	0,12
H97	3	1,70	0,08	H140	4	4,80	0,17
H98	5	3,40	0,10	H141	2	2,30	0,16
H99	3	1,80	0,09	H142	5	2,20	0,06
H100	3	2,60	0,12	H143	3	7,00	0,33
H101	4	2,00	0,07	H144	3	1,60	0,08
H102	2	15,75	1,13	H145	4	8,90	0,32
H103	2	1,50	0,11	H146	4	7,00	0,25
H104	2	5,00	0,36	H147	1	8,70	1,24
H105	2	1,00	0,07	H148	4	8,50	0,30
H106	3	6,60	0,31	H149	2	3,70	0,26
H107	4	3,80	0,14	H150	4	15,40	0,55
H108	4	1,75	0,06	H151	3	11,30	0,54
H109	5	3,50	0,10	H152	3	3,90	0,19
H110	3	21,90	1,04	H153	4	7,00	0,25
H111	5	2,40	0,07	H154	2	7,40	0,53
H112	3	5,70	0,27	H155	3	3,30	0,16
H113	4	6,30	0,23	H156	1	1,30	0,19
H114	4	2,20	0,08	H157	4	4,50	0,16
H115	2	2,30	0,16	H158	5	3,10	0,09
H116	2	6,55	0,47	H159	1	1,00	0,14
H117	3	4,20	0,20	H160	1	4,80	0,69
H118	5	10,50	0,30	H161	5	5,30	0,15
H119	1	7,00	1,00	H162	5	3,50	0,10

Código	Personas por hogar	Cantidad (kg)	GPC (kg/hab*d)	Código	Personas por hogar	Cantidad (kg)	GPC (kg/hab*d)
H120	4	8,70	0,31	H163	2	2,10	0,15
H121	1	9,20	1,31	H164	3	3,00	0,14
H122	3	6,80	0,32	H165	3	14,00	0,67
H123	2	4,30	0,31	H166	4	10,10	0,36
H167	5	6,50	0,19	-	-	-	-
H168	4	2,10	0,08	-	-	-	-
H169	4	12,10	0,43	-	-	-	-
H170	5	5,00	0,14	-	-	-	-

Anexo 10. Peso total de los residuos orgánicos generados en los comercios muestreados y durante la semana del estudio

Código	Tipo de comercio	Nombre del comercio	Peso total de RO (kg)
C1	Soda	Soda Antojitos	22,0
C2	Soda	Soda Rapicomidas El Estadio	11,6
C3	Restaurante	Pollos Kliver	48,3
C4	Restaurante	Almosa	19,1
C5	Soda	Café y soda doña Mey	22,7
C6	Soda	Soda Esquinita tía Luz	36,0
C7	Panadería	Panadería Samuel	20,2
C8	Panadería	Panadería El Buen Sabor	15,7
C9	Bar	Bar 80's	17,6
C10	Soda	Soda Chayo	14,1
C11	Panadería	Panadería Barunch	3,0
C12	Soda	Soda La Carpa	25,7
C13	Carnicería	Centro de carnes Montecillos	2,7
C14	Soda	Soda Colegio San Francisco	56,3
C15	Panadería	Panadería La Espiga	3,3
C16	Restaurante	Restaurante Fu Ru Gui	168,7
C17	Soda	Soda El Banco	166,5
C18	Soda	Soda familia Guerrero	166,5
C19	Soda	Soda La Urba	30,8
C20	Verdulería	Verdulería El Valle 2	247,3
C21	Comida rápida para llevar	Restaurante Caña Brava	76,0
C22	Comida rápida para llevar	Sabores del Trópico	98,4
C23	Soda	Soda Papillos	91,4
C24	Restaurante	Pizzas Garden	80,4
C25	Verdulería	Verdulería Los Turrialbeños	506,2
C26	Soda	Soda Oasis	97,0

Código	Tipo de comercio	Nombre del comercio	Peso total de RO (kg)
C27	Verdulería	Mercado agrícola N°01	553,3
C28	Restaurante	Restaurante Valverd's	61,0
C29	Carnicería	Carnicería Toro Amarillo	60,6
C30	Verdulería	Mercado agrícola N°02	82,6
C31	Restaurante	El Deseo	330,0
C32	Verdulería	Verdulería por la parada	450,0
C33	Verdulería	Verdulería de la carreta	1160,0
C34	Restaurante	Restaurante La Bodega	46,8
C35	Soda	Soda La Virgen	72,5
C36	Soda	Sabores Criollos	21,3
C37	Restaurante	Restaurante Eli's	69,7
C38	Verdulería	Verdulería Mitzy	20,8
C39	Restaurante	Restaurante Xing Long	89,2
C40	Verdulería	Verdulería Guapifrut	300,0
C41	Supermercado	Supermercado MaxiConsumo	142,5
C42	Restaurante	Soda Cacerolas	12,0
C43	Comida rápida para llevar	Patty's house	6,0
C44	Soda	Soda Vivo	4,7
C45	Pizzería	Pizzería Trinacria	3,6
C46	Supermercado	Peri	138,9
C47	Comida rápida para llevar	Burger's	14,0

Anexo 11. Comparativa de proyectos de compostaje: Volumen de residuos orgánicos, recursos humanos y tamaño de plantas por municipalidad en Costa Rica

Gobierno local	Personal	Residuos recolectados (t/mes)	Tamaño de la planta (m ²)
Alvarado	7	104	730
Jiménez	2	43	544
Pérez Zeledón	6	246	3 000
San Isidro	2	2	375
San Rafael	1	3-4	282
Tilarán	4	0,78	100

Nota. Tomado de *Guía de buenas prácticas municipales para la instalación y operación de plantas de compostaje* (p.12), por Municipalidad de Pérez Zeledón, 2022.

Anexo 14. Base de datos municipal sobre consumos de combustible

Autoguardado Com Combustible Ambie... Guardado Celine Salazar

Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda Comentarios Compartir

Nº Doc.	Fecha	Hora	Tienda	Modelo	Matrícula	Submarca	Soporte	Producto	Volumen	PVP	Dto	Importe	Id. conductor	Kilometraje
43249	01/02/2023	06:43:07	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	158,005	750	0	118504	1234	72059
03216	01/06/2023	06:12:00	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	150	636	0	95400	1234	77529
30835	01/09/2023	06:31:35	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	160	590	0	94400	1234	82604
63801	01/12/2023	06:20:12	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	168,443	714	0	120268	1234	87164
05799	02/06/2023	12:34:59	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	225,005	636	0	143103	1234	98490
272	02/08/2023	06:49:00	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	160,008	574	0	91845		80874
47293	03/07/2023	09:55:02	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	233,69	583	0	136241	1234	99685
21781	03/11/2023	06:07:37	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	95,004	705	0	66978	1234	85611
07337	04/01/2023	08:20:41	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	196,004	846	0	165819	1234	92149
07158	04/01/2023	06:37:32	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	151,006	846	0	127751	1234	70685
64499	04/05/2023	06:12:25	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	170,008	634	0	107785	1234	76082
50118	05/07/2023	06:40:19	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	160,003	574	0	91842	1234	79357
36347	05/09/2023	10:52:02	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	186,914	590	0	110279	1234	102367
87394	06/03/2023	09:05:38	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	215,633	747	0	161078	1234	94831
87042	06/03/2023	06:31:49	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	150,004	747	0	112053	1234	72995
30339	06/04/2023	06:02:51	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	118,139	634	0	74900	1234	74630
81206	06/10/2023	09:48:43	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	213,957	705	0	150840	1234	103826
80757	06/10/2023	06:15:15	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	205	705	0	144525	1234	84454
95249	07/08/2023	09:34:38	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	234,697	574	0	134716	1234	101203
27379	07/11/2023	10:24:09	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	255,319	705	0	180000	1234	105491
72917	07/12/2023	14:01:25	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	155,195	691	0	107240	1234	87580
72100	07/12/2023	07:57:42	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	223,483	691	0	154427	1234	1060969
52604	08/02/2023	06:55:44	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	163,115	748	0	122010	1234	93670
52565	08/02/2023	06:30:46	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	150,004	748	0	112203	1234	72430
13096	08/06/2023	06:23:50	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	150	583	0	87450	1234	77891
41090	08/09/2023	06:32:22	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	170,025	634	0	107796	1234	82970
98224	09/08/2023	06:40:02	POCOCI	INTERNATIONAL	7440		555E0040150B3	Diesel	169,01	574	0	97012	1234	81243
32225	10/04/2023	09:27:15	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	195,312	634	0	123828	1234	96226
84	10/05/2023	14:44:00	POCOCI	CUMMINS	7375		555E0040150B3	Diesel	227,632	637	0	145002		97565

Consumo de combustible anual

Nota. Tomado de Base de Datos de Municipalidad de Pococi, 2023.