



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIAS

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

“Diseño de un sistema de gestión integral de residuos sólidos en un invernadero de tomates en Atuntaqui- Ecuador para su aprovechamiento y minimización.”

Realizado por:

ANDRÉS ABELARDO MARTÍNEZ CHICAIZA

Director del proyecto:

PhD Katty Coral Carrillo

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Quito, 13 de septiembre de 2025

DECLARATORIA JURAMENTADA

Yo, ANDRÉS ABELARDO MARTINEZ CHICAIZA, con cédula de identidad # 1718365685, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ninguna grada a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Andrés Martínez", is written over a horizontal line.

FIRMA

1718365685

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“Diseño de un sistema de gestión integral de residuos sólidos en un invernadero de tomates en Atuntaqui- Ecuador para su aprovechamiento y minimización.”

Realizado por:

ANDRES ABELARDO MARTINEZ CHICAIZA

Como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Ha sido dirigido por el profesor

PhD. KATTY CORAL CARRILLO

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor

FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

PhD. JOHANNA MEDRANO BARBOZA

PhD. MIGUEL MARTÍNEZ FRESNEDA

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador

FIRMA

FIRMA

Quito, 13 de septiembre de 2025

El presente Trabajo de Fin de Carrera ha sido realizado dentro del Programa de

Investigación de la Universidad Internacional SEK denominado:

Desarrollo Tecnológico, Energía y Ambiente

Perteneciente a la Facultad de Arquitectura e Ingenierías

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo y enseñanzas que me han guiado hasta cumplir este sueño.

A mis abuelitos, que, aunque ya no están físicamente conmigo, viven en mi corazón y han sido mi inspiración en cada paso de este camino.

A mi pareja, por su paciencia, motivación y compañía en los momentos más difíciles.

Este logro es también suyo, pues sin ustedes nada de esto habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por darme la vida, la fuerza y la sabiduría necesarias para llegar hasta este momento.

A mis padres, por su apoyo incondicional, sus consejos y sacrificios que me inspiraron a nunca rendirme.

A mis hermanas, por su cariño, compañía y por animarme incluso en los días más difíciles.

A mis abuelitos, que desde el cielo me acompañaron y guiaron en cada paso de este proceso; este logro es también un homenaje a su memoria.

A mi pareja, por estar a mi lado en los días de cansancio y por celebrar conmigo cada pequeño avance.

A mi tutora de tesis, Katty Coral, por su guía, paciencia y por motivarme a pulir cada detalle de este trabajo hasta lograr el mejor resultado posible.

A mis profesores y al cuerpo docente de la universidad, por compartir su conocimiento y exigirme lo mejor de mí mismo.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de carrera, por las risas, el apoyo y los momentos que hicieron de este camino una experiencia inolvidable.

Para someter a:

To be submitted:

“Diseño de un sistema de gestión integral de residuos sólidos en un invernadero de tomates en Atuntaqui- Ecuador para su aprovechamiento y minimización.”

¹Universidad Internacional SEK, Facultad de Arquitectura e Ingenierías

Quito, Ecuador.

*AUTOR DE CORRESPONDENCIA: PhD Katty Coral Carrillo

Universidad Internacional SEK,

Facultad de Arquitectura e Ingenierías

Quito, Ecuador.

Teléfono: 0983084617; email: katty.coral@uisek.edu.ec

Artículo de tesis

Diseño de un sistema de gestión integral de residuos sólidos en un invernadero de tomates en Atuntaqui- Ecuador para su aprovechamiento y minimización.

Trabajo final de Grado

Andrés Abelardo Martínez Chicaiza, Katty Veronica Coral Carrillo (Tutor)

¹ Carrera Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Ambientales, UISEK; aamartinez.amb@uisek.edu.ec

² Afiliación 2; aamartinez.amb@uisek.edu.ec

* Autor de Correspondencia: aamartinez.amb@uisek.edu.ec; Tel.: (0959177549; (593))

Resumen: El manejo ineficiente de residuos sólidos agrícolas representa una problemática creciente en sistemas de producción hortícola intensiva bajo invernadero, con efectos negativos en la sostenibilidad ambiental y la eficiencia operativa. Frente a esta situación, se planteó el diseño e implementación de un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) para un invernadero de tomates en Atuntaqui, con la hipótesis de que una gestión estructurada y basada en indicadores permitiría reducir impactos ambientales y transformar residuos en recursos útiles. Para ello, se aplicó una metodología cuantitativa que combinó levantamiento de línea base en campo, estimaciones de generación por fila de cultivo, clasificación de residuos y evaluación de indicadores clave de desempeño. Los principales resultados mostraron una generación promedio de residuos orgánicos de 6,9 kg por fila cada 20 días, proyectando un total de 9 418,5 kg por ciclo productivo completo. El 80 % de estos residuos fue valorizado mediante compostaje, con una producción mensual estimada de 1 175 kg de abono. En cuanto a los residuos inorgánicos, el 68 % fue recuperado para reciclaje y un 43 % del total de residuos fue desviado de la disposición final, reduciendo la carga sobre el relleno sanitario de Ibarra. Asimismo, se observó una reutilización promedio de tres ciclos por semestre en materiales plásticos agrícolas. Estos resultados confirman la viabilidad técnica y ambiental del SGIRS, así como su potencial replicabilidad en otras unidades de producción agrícola bajo condiciones similares. Se concluye que, con un adecuado monitoreo, capacitación continua y ajustes progresivos, este sistema permite optimizar la gestión de residuos, fortalecer la economía circular y reducir impactos negativos en entornos agrícolas intensivos.

Palabras clave: compostaje; gestión ambiental rural; residuos hortícolas; producción intensiva; economía circular;

Abstract The inefficient management of agricultural solid waste represents a growing problem in intensive horticultural production systems under greenhouse, with negative effects on environmental sustainability and operational efficiency. Faced with this situation, the design and implementation of an Integral Solid Waste Management System (SGIRS) for a tomato greenhouse in Atuntaqui was proposed, with the hypothesis that a structured and indicator-based management would reduce environmental impacts and transform waste into useful resources. For this, a quantitative methodology was applied that combined baseline survey in the field, generation estimates by crop row, waste classification and evaluation of key performance indicators. The main results showed an average generation of organic waste of 6.9 kg per row every 20 days, projecting a total of 9 418.5 kg per complete productive cycle. 80% of this waste was recovered by composting, with an estimated monthly production of 1 175 kg of fertilizer. As for inorganic waste, 68% was

recovered for recycling and 43% of the total waste was diverted from the final disposal, reducing the burden on the Ibarra landfill. Likewise, an average reuse of three cycles per semester was observed in agricultural plastic materials. These results confirm the technical and environmental viability of the SGIRS, as well as its potential replicability in other agricultural production units under similar conditions. It is concluded that, with an adequate monitoring, continuous training and progressive adjustments, this system allows optimizing waste management, strengthening the circular economy and reducing negative impacts in intensive agricultural environments.

Keywords: rural environmental management; horticultural waste; intensive production; circular economy.

1. Introducción

La gestión deficiente de residuos sólidos agrícolas constituye una problemática ambiental de creciente relevancia en el contexto ecuatoriano. Provesar S.A. en el cantón Atuntaqui, el invernadero de tomate muestra una absoluta falta de clasificación de residuos orgánicos e inorgánicos. La empresa Provesar S.A. actualmente deposita sus residuos en el vertedero municipal de Ibarra, el cual ha comenzado a presentar varios problemas ambientales debido a su uso constante (Lorente et al., 2018).

La acumulación inadecuada de residuos sólidos ha provocado lixiviados, malos olores, proliferación de vectores y emisión de gases de efecto invernadero, intensificando el problema de sostenibilidad ambiental y deteriorando la imagen corporativa a nivel local. Estas consecuencias se dan por la falta de una gestión integral de residuos que afecta no solo a los sistemas ambientales del cantón, sino también a los ecosistemas nacionales (Paredes y Salazar, 2022).

Algunos estudios señalan que la sostenibilidad agrícola se basa en la aplicación de los principios de prevención, minimización, valorización y disposición final controlada (MAATE, 2021). En esta línea, la correcta separación de residuos orgánicos biodegradables susceptibles de ser compostados e inorgánicos sintéticos o minerales destinados al reciclaje o confinamiento permite cerrar ciclos productivos y se ajusta a los principios de la economía circular (Ríos y Mendoza, 2022).

A nivel micro ambiental, se puede prever la reducción de la presión sobre el relleno sanitario de la ciudad de Ibarra, la mejora sanitaria del invernadero, y potenciar la imagen ambiental de la empresa. En mediano plazo, el proyecto podría ser un referente metodológico para otras unidades agrícolas, promoviendo un cambio cultural hacia la sostenibilidad profunda (Lozano y Beltrán, 2021). Simultáneamente, se abre la posibilidad de obtener certificaciones ambientales como el Sello Verde, que elevan el valor reputacional y competitivo de la empresa (MAATE, 2022).

La investigación se fundamenta en la gestión, como parte de los conceptos sostenibles a aplicar en la recolección y disposición de residuos sólidos, que comprende el terreno técnico, legal y administrativo desde la generación hasta el cierre (ONU Medio Ambiente, 2023). Los dos tipos más importantes que son valorados son los orgánicos biodegradables que pueden ser aprovechados a través del composteo y los inorgánicos de origen sintético o mineral que requieren reciclaje o confinamiento controlado. La correcta consideración de ambos aspectos permite el diseño de sistemas en medios agrícolas propiciando el cierre de ciclos productivos atendiendo a la economía circular.

En este contexto, se establece como objetivo el diseño de un sistema de gestión integral de residuos sólidos, que se adecue a las particularidades de un invernadero. Este sistema aspira a ser funcional técnicamente, legalmente viable y estratégicamente replicable. La propuesta incluye acciones orientadas a la reducción del volumen de los residuos que son enviados al relleno sanitario de Ibarra, el aumento de la recuperación de materiales reutilizables, y el cumplimiento de lo dispuesto en el Código Orgánico del Ambiente (COA) y su reglamento (RCOA), los que establecen principios de prevención, minimización, valorización y disposición final controlada (MAATE, Código Orgánico del Ambiente y su reglamento, 2021). Esta investigación utilizó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, transversal y de campo. Se llevó a cabo

observación directa, registros sistemáticos, y mediciones físicas tales como el peso, volumen y la frecuencia. La información se trató con análisis estadísticos básicos apropiados y que sustenten la propuesta, verificando su viabilidad operativa, económica y organizacional.

2. Antecedentes

2.1. *La gestión de residuos sólidos como desafío ambiental global*

El alarmante aumento en la generación de residuos sólidos en el siglo XXI puede atribuirse a un modelo acelerado de consumo y producción de desechos. Esta tendencia afecta a todos los tipos de residuos, incluidos los domésticos, agrícolas, industriales e incluso electrónicos, lo que plantea un desafío ambiental global (Yatoo et al., 2024).

Las consecuencias de una gestión inadecuada de residuos son severas e incluyen la propagación de vectores de enfermedades, la contaminación del suelo y el agua, la emisión de metano y otros gases, y el deterioro de la salud pública (Shah et al., 2021). Este problema es peor en regiones rurales y suburbanas donde el vertido a cielo abierto es una práctica común (Sharma y Jain, 2020).

En este sentido, tecnologías como la digestión anaerobia, la incineración controlada y el reciclaje especializado surgen como soluciones para mitigar los impactos y recuperar valor de los desechos al (Prajabati et al., 2021). Sin embargo, se necesitan más que soluciones técnicas. Avanzar hacia una gestión sostenible requiere cambios regulatorios, infraestructura mejorada y educación ambiental (Varjani et al., 2022).

2.2. *Concepto y evolución de la gestión integral de residuos*

La gestión integrada de residuos ha pasado de un modelo de recolección y disposición a uno preocupado por el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de un producto. Las prácticas tradicionales como el vertido en vertederos y la incineración ya no son sostenibles debido a sus efectos contaminantes y agotadores de recursos (Aiguobarueghian et al., 2024).

En respuesta a estos desafíos, la economía circular aboga por un cambio estructural basado en los principios de reducir, reutilizar, reciclar y recuperar. Busca cerrar los ciclos de materiales, reducir la extracción de recursos y rediseñar completamente los procesos de producción para que sean más sostenibles (Sondh et al., 2024).

Este cambio depende en gran medida de la innovación tecnológica. El seguimiento de residuos, la certificación de materiales reciclados y la optimización de la eficiencia operativa a través de sistemas de control y monitoreo digital en tiempo real son posibles gracias a la tecnología blockchain (Bhubalan et al., 2022). Tales avances fomentan la aparición de modelos de negocio circulares con un fuerte potencial de recuperación económica y ambiental.

Los beneficios no son solo ambientales. La economía circular crea empleos verdes, reduce los costos operativos, fortalece las economías locales y mejora la competitividad empresarial en general a través de una mayor eficiencia y políticas de recursos centradas en la reutilización y reparación (González-Sánchez et al., 2023).

Este enfoque está en alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente aquellos relacionados con el consumo responsable, la acción climática y la gestión de recursos. Su implementación es una herramienta de política pública eficiente para reducir el impacto en los ecosistemas mientras se promueve la equidad intergeneracional (Velenturf y Purnell, 2021).

La literatura argumenta que, para lograr este paradigma, se necesita un marco regulatorio sólido, la institucionalización de principios de gestión jerárquica, asociaciones intersectoriales y financiamiento específico. Solo de esta manera se puede asegurar la implementación de prácticas circulares en diferentes contextos espaciales (D'Adamo et al., 2024).

La transición hacia una economía circular abarca, en esencia, un cambio de paradigma que redefine las relaciones entre consumo, producción y sostenibilidad. Este enfoque fomenta la transformación de residuos en recursos; la gestión sistemática en una base de sociedades resilientes y sostenibles (Ogunmakinde et al., 2022).

2.3. Principios y etapas de la gestión moderna de residuos sólidos

El manejo moderno de basura se ha alejado de la mera recolección y depósito en un vertedero. Hoy, ejecutores públicos y privados hablan de un ciclo cerrado donde el foco está en evitar daños ambientales, recuperar recursos útiles y cuidar la salud colectiva. La receta incluye cortar generación en la fuente, volver a usar objetos, reciclar de modo moralmente aceptado y, al final, valorar lo que queda convirtiéndolo en energía útil (Das et al., 2019).

Todo comienza en el instante en que alguien genera un residuo. El peso y la clase de lo desechado depende mucho del bolsillo de quien compra, de las costumbres locales y del lugar donde se vive. Barrios modestos suelen aportar sobras de comida y hojas secas; zonas acomodadas, en cambio, entregan una mezcla variada de plásticos, latas y cartón, dato que manda en los planes de recolección y en su posterior tratamiento (Nanda y Berruti, 2020).

Recoger el material es una de las partidas más encarecidas del esquema global y al mismo tiempo la más delicada. Cuánto se gasta aquí depende de cuán a menudo pasan los camiones, de qué infraestructura hay en pie y de los gadgets electrónicos que acompañen al operativo. Sistemas de información geográfica y sensores de a bordo han automatizado las rutas, bajado las emisiones de CO₂ y permitido que el servicio llegue a más rincones sin incrementar mucho el costo (Neto et al., 2024).

El movimiento cotidiano de camiones, aunque pasa casi desapercibido, es troncal en cualquier cadena de manejo de materiales. Cuando la ruta se perfila en función de la clase de desecho, la geografía del casco urbano, la periodicidad del servicio y el consumo de combustible, mejora la gestión de los residuos. Plataformas basadas en la nube permiten seguir a cada unidad en segundos y ajustar sobre la marcha, algo que hace unos años era pura especulación académica (Neto et al., 2024).

En las naves de tratamiento se entrelazan operaciones físicas, químicas y biológicas. Unas veces el operador levanta una pala para compostar al aire; otras, la máquina separa plásticos por sus tonos y después llega la fase de pirólisis y, si todo va según lo previsto, la digestión anaeróbica cierra el ciclo devolviendo biogás. Cada uno de esos pasos corta el volumen total y, de paso, empaqueta energía, abono o materia prima secundaria listas para salir al mercado (Dey, 2020).

La Valorización, se ha vuelto el corazón de las políticas contemporáneas. Hacer que un residuo deje de ser sólo lastre y, al mismo tiempo, arroje euros o megavatios al sistema permite ampliar la duración de los vertederos y, de rebote, alimenta arriesgadas start-ups, trabajos verdes e inversiones que antes miraban de reojo el sector (Ezeudu y Ezeudu, 2019).

La disposición final de residuos, aunque figura al pie de la pirámide de manejo, no pierde relevancia frente a fracciones que no pueden reciclarse ni valorizarse. Ingenierías recientes: biorreactores de ingeniería instalada, recirculación calculada de lixiviados y colectores forzados de biogás, han acortado el plazo de estabilización del cuerpo sanitario y han comprimido su huella ambiental (Nanda y Berruti, 2020).

Desde mediados de 2010, la agenda global se ha movido hacia un esquema que entrelaza las etapas de generación, recolección, tratamiento y destino bajo los ejes de sostenibilidad, innovación inclusiva y justicia territorial. La gestión contemporánea ya no responde solamente al síntoma del consumo, sino que reinvierte los flujos de materiales en una palanca de transformación productiva, social y ecológica situada en el centro de la economía circular (Hrabec et al., 2019).

2.4. Marco institucional internacional para la gestión ambiental

La gestión global de residuos peligrosos se rige formalmente por el Convenio de Basilea, cuya prohibición de exportación y obligación de tratamiento local suena rotunda en el papel. En la práctica, los obstáculos legislativos y administrativos identificados la convierten en una promesa a medias en varios de sus países signatarios (Zhamiyeva et al., 2021).

La Unión Europea ha hecho frente común a través de directivas sectoriales que tratan desde aparatos eléctricos hasta envases de plástico. Cada norma arrastra consigo el principio de responsabilidad ampliada del productor y un orden jerárquico que intenta privilegiar el reciclaje frente a la mera disposición final (Halkos y Aslanidis, 2024).

Fuera de la órbita europea, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente pide que los Gobiernos usen datos científicos y creen foros intergubernamentales para manejar en conjunto tanto productos químicos como desechos (Wang et al., 2021). Ese enfoque colaborativo ha sido descrito como una red de redes, limitada hasta ahora por el escaso compromiso de ciertos países industriales.

Las naciones en vías de desarrollo, entretanto, tropiezan con escollos más concretos: financiamiento precario y capacidad técnica dispersa. Bastita et al. (2021) muestran que, sin esos recursos básicos, la adopción de tecnologías limpias y el respeto a los instrumentos internacionales quedan a merced de buenas intenciones.

En medio de estas disparidades, la economía circular y la escala de jerarquía de residuos sobreviven como principios normativos universales. Su éxito, advierte (Awino y Aplitz, 2023), promete depender de reformas institucionales, inmensas inyecciones de capital y campañas educativas persistentes en esos entornos donde la gestión lineal todavía marca el compás.

Un marco institucional global sin duda proporciona un punto de partida, pero su impacto real se mide en la capacidad de las comunidades a nivel local para absorberlo y adaptarlo a sus realidades concretas. La cooperación interregional y el refuerzo institucional entre los países más vulnerables son, por lo tanto, requisitos no negociables para que esa estructura inicial se convierta en acción efectiva (Zorpas, 2020).

A nivel nacional, el marco normativo ecuatoriano está encabezado por el Código Orgánico del Ambiente (COA) y su reglamento, que establecen los principios de prevención, minimización, valorización, y disposición final de residuos sólidos. El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) es la entidad responsable de normar y supervisar la gestión integral de residuos. Además, el país cuenta con normas técnicas como la NTE INEN 2841:2014, que define la clasificación, manejo y señalización de residuos peligrosos y no peligrosos. Estas regulaciones se complementan con ordenanzas municipales específicas, como las emitidas por el GAD de Ibarra, que obligan a los generadores a clasificar, almacenar y disponer adecuadamente los residuos, en línea con los principios de economía circular.

2.5. Tipología de residuos y criterios de clasificación

La clasificación de residuos cumple un papel decisivo en el diseño de tratamientos a medida; al definir cómo se separan los materiales, se preservan recursos, se reducen costos y se evitan sorpresas ambientales. Según kim et al. (2023), el primer paso siempre es la segmentación, no un gesto administrativo sino una inversión en orden.

La separación por origen se traduce en tres grupos principales: los desperdicios que genera el hogar, los que producen las fábricas y los aparatos electrónicos al final de su vida útil. Poudel y Poudyal (2022) señalan que cada catálogo cuenta con su propio perfil de toxicidad, volumen y manejo, así que mezclarlo todo ahorra poco y contamina mucho.

La peligrosidad marca la segunda pauta. Los materiales que son tóxicos, inflamables, corrosivos, o caen en una de las categorías CRETIB, viajan con ficha técnica, sellos de advertencia y rutas cerradas (Goel y Singh, 2024); el residuo corriente en cambio puede tratarse casi de cualquier forma.

La composición orgánica versus inorgánica añade otra capa de gestión. Restos de cocina y papel se descomponen en el compostador mientras los plásticos, los metales y los vidrios requieren de tratamientos térmicos o de reducción de tamaño como prensado, hornos o molinos especializados para recuperar su valor (José et al., 2024). Por último, la biodegradabilidad ha aparecido en los discursos políticos como el criterio estelar. Lo que se deshace en meses vuelve al ciclo sin dejar huella; lo que no se deshace puede esperar generaciones y seguir dañando, así que ese contraste ha pasado a ser el eje de muchas normativas recientes (Bharadwaj et al., 2024).

La fusión reciente de algoritmos de aprendizaje automático con plataformas espectroscópicas ha hecho que la clasificación automática de residuos sea más precisa, reduzca el margen de error y opere sobre flujos de datos en tiempo real (Goel y Singh, 2024).

Agrupar los desechos según categorías técnicas, normativas y tecnológicas sigue siendo un paso clave para atender la diversidad de materiales y al mismo cumplir con los fundamentos de la

economía circular, establecidos en la normativa ecuatoriana: el Código Orgánico del Ambiente (COA) y su reglamento; ambos promueven la prevención, minimización, valorización y aprovechamiento de residuos como parte de este modelo (Ministerio del Ambiente, 2022), (Kim et al., 2023).

2.6. Importancia de la separación en origen para la eficiencia del sistema

La separación en origen constituye un pilar fundamental en la gestión contemporánea de residuos sólidos. Al clasificar los materiales justo donde se generan, se minimiza la contaminación cruzada y, a la postre, se facilita el reciclaje y se restringe el volumen que acaba en los vertederos. Esta mejora operativa reporta ventajas tanto económicas como ambientales (Tallentire y Steubing, 2020). Observaciones realizadas en varios países nórdicos sugieren que dividir flujos específicos, como la orina y las aguas negras, permite recuperar nutrientes vitales como fósforo y nitrógeno. Tal enfoque reduce la dependencia de fertilizantes minerales y atenúa los impactos ecológicos asociados a su producción y uso (Lehtoranta et al., 2022).

Investigaciones llevadas a cabo en China corroboran que una separación efectiva en la fuente ayuda a mitigar problemas como el calentamiento global, la eutrofización y la acidificación. Esto se logra a través de una menor liberación de metano y la preservación de recursos naturales sensibles (Zhang et al., 2025).

Cuando el entorno urbano cuenta con infraestructura limitada, una clasificación previa se vuelve indispensable para que los sistemas descentralizados funcionen de manera sostenible. Al optimizar el tratamiento y la recuperación de agua y nutrientes, dicha práctica ayuda a achicar la huella ambiental global (De Simone Souza et al., 2023).

El reciclaje de nutrientes a partir de orina, en el que el líquido es sometido a un proceso de nitrificación-controlada-digital, puede recuperar fertilizantes biológicamente seguros. Esa clase de tecnología cierra el ciclo de nitrógeno y fósforo en entornos tanto rurales como urbanos (Wang et al., 2021).

La adopción efectiva de tales sistemas depende de la voluntad colectiva. Educación ciudadana, estímulos reglamentarios y el respaldo de políticas públicas transforman esa solución técnica en un quehacer habitual para los barrios que persiguen la sostenibilidad (Aliahmad et al., 2024).

2.7. Tecnologías básicas y avanzadas de clasificación de residuos

La forma en que se separan los desechos ha cambiado mucho por el avance de la tecnología. Antes, alguien metía la mano en la basura. Hoy, los camiones y las plantas usan sensores y algoritmos que parecen sacados de una película de ciencia-ficción, aunque en realidad son solo un montón de códigos y electrodos (Wilts et al., 2021).

A mediados de lo que algunos todavía llaman la era analógica, los ingenieros usaban sensores ópticos, magnéticos y de densidad para empujar el plástico, el papel o el metal a su camino sin intervención humana. Esos aparatos ya daban velocidad, pero claro, no eran la solución definitiva (Zhao y Li, 2022).

Más adelante, las cámaras y el aprendizaje profundo entraron al juego y empezaron a reconocer los liosos tejidos sintéticos o los plásticos manchados de comida. Esa flexibilidad es justo lo que hace que los sistemas aguanten el desorden de una ciudad grande (Lu y Chen, 2022). Mientras tanto, brazos robóticos equipados con lentes y dedos que sienten siguen el ritmo por su cuenta; gracias a ellos, se sacan más metales y botellas limpias que nunca (Kiyokawa et al., 2024).

La espectroscopía de infrarrojo cercano, mejor conocida como NIR, se ha dado una mano con redes neuronales y ahora puede decidir qué desecho es cuál incluso si se ven casi idénticos. Esto viene de perlas en el reciclaje textil, donde distinguir un hilo de otra marca la diferencia entre perder materia y volver a usarla (Du et al., 2022).

Clasificar por tacto también está ganando terreno: un sensor que mide la presión ejercida sobre un material como la espuma funciona cuando la luz simplemente se rinde. Este truco ya está ayudando con esos materiales compuestos que suelen hacer que las cámaras se queden ciegas (Guo et al., 2022).

El asunto no es perfecto. Los plásticos de varias capas o los envases llenos de untar siguen siendo un rompecabezas, y falta mucha data bien etiquetada para que el software aprenda en serio. Los expertos creen que mezclar varios tipos de sensores en un solo equipo y dejar que la inteligencia artificial compita entre ellos podría desatorar ese nudo (Lubongo y Alexandridis, 2022).

Estos avances técnicos están cambiando el juego de los residuos. Manejan el material con mayor puntería, reducen huellas contaminantes y empujan a las fábricas hacia ciclos más cerrados, automáticos y, hay que decirlo, más resistentes (Dodampegama et al., 2024). En el caso ecuatoriano, si bien aún no se cuenta con tecnologías de clasificación completamente automatizadas como las descritas en países industrializados, se han dado pasos iniciales hacia la tecnificación mediante la implementación de plantas de separación manual y semiautomatizada en ciudades como Quito y Cuenca. Además, el MAATE ha promovido el uso de tecnologías apropiadas en centros de acopio y reciclaje comunitario, aunque su adopción sigue limitada por factores económicos y de capacitación técnica. (Ministerio del Ambiente, 2022).

2.8. Residuos agrícolas y su impacto ambiental

Generación de residuos en sistemas de producción agrícola

La agricultura a gran escala suele pelear por más kilos en el camión y, de paso, deja un montón de basura por el camino. Es hora de pensar en cerrar el círculo y hacer las cosas con miras a la sostenibilidad (Duque-Acevedo et al., 2020).

Sobran hojas, tallos y pieles que, en lugar de quemar, se pueden convertir en compost, en energía o en abono casero. En Colombia, por ejemplo, las cáscaras de cacao se están metiendo en el juego y funcionan como ingrediente estrella de una nueva cadena de valor donde nadie se queda fuera (Meza-Sepúlveda et al., 2021).

El plástico blanco que cubre los cultivos no se desintegra solo, y en lugares como Almería ya han visto cómo se amontona más rápido que las cajas de naranjas. Por eso, allí empujan el reciclaje y prueban con lonas que, aunque suenan a promesa, se rompen menos que el sol sabatino (Sayadi-Gmada et al., 2019).

Las mallas rasgadas, los postes partidos y los esqueletos de invernadero también exigen tratamiento porque, de otro modo, se integran en el vertedero y nunca más se les ve. Algunas granjas han comenzado a reutilizar el calor residual en sus procesos internos, lo que permite reducir la huella de carbono asociada a sus operaciones agrícolas (Miernicki et al., 2020).

Un agricultor que prueba la rotación de cultivos o planta varios productos juntos al mismo tiempo, por lo general, necesita menos fertilizantes comprados y termina sacando menos basura de su campo. Los recortes que se tiran del campo no son solo paquetes vacíos; pueden llevar bacterias, gastar plata en su limpieza y, de paso, manchar la fama del productor. Para que no pase eso, es obligatorio que el dueño del rancho, la oficina de salud y las leyes que están sobre papel se alineen y apuesten por maquinarias verdes y maneras de producir que al planeta no le duelan (Castillo-Díaz et al., 2021).

Consecuencias ecológicas del mal manejo de residuos en el agro

La disposición incorrecta de desechos agrícolas, desde botellas de plástico hasta restos de cultivos, compacta la superficie del suelo y lo convierte en una costra impermeable. Nada penetra ahí y el agua se escurre por la ladera; esa misma inercia arrastra fertilidad y módulos de carbono que jamás regresan, como advierte (Castillo-Díaz et al., 2021).

Si se queda cerca de un arroyo, la mezcla de plásticos, agroquímicos y estiércoles forma un cóctel que acaba en el agua a la primera lluvia. En su viaje arrastra nitrógeno y fósforo, y en el destino esos nutrientes desatan un estallido algal que consume el oxígeno necesario para que cualquier pez respire, un ciclo de la muerte que (Hu et al., 2019) han documentado con detalle.

Los plásticos que flotan o se entierran también perturban a los insectos polinizadores y a sus predadores naturales porque rompen los microhábitats que ocupaban. (Zaki et al., 2024) señalan que esa quiebra cadena por cadena termina por extraer servicios ecológicos que ni siquiera notábamos hasta que ya no están.

Por último, los excedentes de fertilizante alteran las matrices biogeoquímicas; el nitrógeno sobrante se oxida y vuela, el fósforo se bloquea en formas inasimilables y la tierra queda ácida, pobre en calcio y ciega ante los nuevos aportes. Investigadores como (Arosemena et al., 2024) vienen señalando que en condiciones así ni el agricultor ni el ecosistema pueden hacer buen uso del insumo económico.

Un manejo improvisado de restos orgánicos puede concentrar sales en puntos aislados del paisaje, y esos parches acaban quemando la micro biota del suelo. Cuando el bioma se desquicia, la descomposición se frena y el reciclaje natural se estanca (Zaki et al., 2024).

La tierra, el agua y la variedad de seres vivos forman un círculo apretado; romperlo exige pensar los residuos de manera conjunta. Aplicar agroecología, educar de verdad, afinar las normas y poner en marcha tecnologías limpias como la rotación, el compost y la recuperación ordenada son pasos inseparables (Hu et al., 2019).

Si se opta por quemar o abandonar desechos, los ecosistemas de cultivo sufren un golpe difícil de salir. Para evitarlo, el compromiso coordinado de comunidades, funcionarios y especialistas es el único camino que puede devolver equilibrio ecológico y mantener la producción alimentaria (Arosemena et al., 2024).

Desafíos estructurales en la gestión rural de residuos

La gestión de residuos en territorios rurales revela casi de inmediato fallas estructurales que, por mantener el statu quo, terminan envenenando el entorno y ampliando las brechas de justicia espacial. Cuando no hay contenedores ni camiones, la gente quema, sepulta o vierte -en el arroyo de la esquina, porque no inventó otra opción- y eso habla menos de desidia que de un vacío institucional que empieza por la ausencia de leyes feas y termina en la indiferencia pública (Villa-Achupallas et al., 2024).

El drama logístico más evidente radica en que no hay nada que recoja nada. En la cuenca amazónica, ni una estación de transferencia, ni un galpón, ni siquiera cubos de colores para separar lo húmedo y lo seco; así, el precio del flete se dispara y las empresas limpias, que podrían probar, prefieren no entrar porque los números no cierran (De Oliveira y Medeiros, 2020).

Si el acero de la infraestructura está ausente, la educación llega aún más débil. El agricultor que tiró plásticos al fuego ayer lo vuelve a hacer hoy, no porque ignore, sino porque nunca le contaron una alternativa que suene plausible; al final, un taller breve sobre compostaje o un curso sobre reciclar envases en la chacra podría habilitar unas soluciones que ya existen, sólo que son silenciosas (Niles, 2020).

La normativa vigente, diseñada principalmente para el sector urbano, pasa por alto las rancherías fragmentadas, el trabajo informal disperso y el escaso tejido comunitario del campo. Por esa limitación, las reglamentaciones ignoran los desechos ganaderos y agrícolas, que por su volumen y por la mezcla corrosiva que arrastran piden un manejo diferencial (Da Silva et al., 2019). Ese desfase entre la norma y la práctica deja a los productores a medias entre el abandono y el improvisar soluciones químicamente peligrosas.

La dificultad del financiamiento, tanto municipal como privado, ahoga cualquier intento de instalar tecnologías duraderas. Un pueblo rural que apenas puede pagar la luz tiene menos margen para levantar plantas de tratamiento, y el problema se agrava cuando el presupuesto se pierde en proyecciones mal pensadas (De Pinna Méndez et al., 2022). Sin incentivos claros, los alcaldes preferirán inaugurar un asfalto de corta vida que arriesgarse a una bóveda de lixiviados que nadie quiere ver.

Frente a esa parálisis, la energía de la gente llana puede marcar la diferencia. Cooperativas que ya cosechan a mano pueden vender biopreparados y, al reciclar plásticos por kilómetro cuadrado, arrastran tanto ahorro como orgullo (De Pinna Méndez et al., 2022). Pero ese talento auto gestionado necesita acompañamiento del Estado; sin equipos básicos y sin permisos claros, la creatividad termina trancada.

En definitiva, encarar el enredo rural de los residuos exige más que piloto ni que discurso; pide inversiones que aguanten el clima, educación que no se pase de moda y una gobernanza hecha

a la medida del paisaje (Villa-Achupallas et al., 2024). Solo así podrá el campo caminar hacia sistemas que sean, a un mismo tiempo, amables con el entorno y justos con quienes allí habitan.

3. Planteamiento del Problema

En el cantón Atuntaquí, provincia de Imbabura, la empresa Provesar ha hecho del cultivo de tomate bajo invernadero su razón de ser. El predio queda exactamente en las coordenadas 0°20'26.2 norte y 78°13'17.2 oeste, un punto rural enclavado en el norte ecuatoriano que combina clima templado y suelo volcánico.

Figura 1

Ubicación de la empresa Provesar



Nota. Fuente: Google. (2025). Google Maps [Mapa satelital]. Recuperado el 31 de julio de 2025, de <https://maps.google.com>

A pesar de su solidez productiva, el invernadero sufre hoy una carencia severa: no existe un sistema interno para clasificar los desechos sólidos que genera la cosecha. La resultante mezcla de bolsas plásticas, restos de planta y embalajes, arrojada al mismo sitio, se precipita en un círculo vicioso que origina lixiviados de olor fuerte y atrae moscas y roedores. Desde una óptica regulatoria, esta desorganización despliega un incumplimiento abierto del Código Orgánico del Ambiente. En términos prácticos, afecta el bienestar inmediato del personal y corre el riesgo de contaminar el suelo vecino.

La presente investigación se centra, por ende, en diseñar un circuito técnico que separe y valore los residuos in situ, transformándolos en insumos o en desechos limpios. Entre los vacíos que hay que llenar están la falta de recipientes claramente marcados, la escasez de capacitación cotidiana y la ausencia de indicadores que permitan saber si la nueva rutina realmente funciona.

La población objeto de estudio está compuesta por el personal operativo y administrativo de la empresa, así como los residuos generados por las actividades agrícolas realizadas en el invernadero. El estudio analizará las prácticas actuales de generación, recolección, almacenamiento y disposición final de residuos, con el fin de proponer un modelo de gestión adaptado a las condiciones reales del entorno.

La investigación se desarrolló en el segundo semestre de 2025, de acuerdo con un cronograma que contempla fases de diagnóstico, diseño, implementación y evaluación de la propuesta. El invernadero de tomates ubicado en Atuntaqui será el escenario de estudio, lo cual permitirá un acceso directo al fenómeno, garantizando así un abordaje contextualizado y operativo de la problemática identificada.

4. Justificación

La investigación que se presenta, fija la mirada en un desajuste ecológico que asedia a muchos invernaderos rurales: las plantillas de recolección y separación de basura, sencillamente, no existen. Un sondeo en la productora Provesar, ubicada en el cantón Atuntaqui, reveló que el desdén por los restos orgánicos y plásticos contamina el suelo, turbia el aire y termina golpeando la salud de quienes trabajan y viven alrededor.

Desde una esquina más académica el proyecto añade otra muestra al catálogo sobre gestión ambiental rural al bosquejar un prototipo de ordenamiento de desechos enfocado en el cultivo de tomate bajo toldos. Dicho prototipo se inscribe sin tropiezo en los anclajes teóricos de la economía circular y el desarrollo sostenible que hoy tratan de darle forma a las normativas del país.

Sobre el terreno la receta pretende, en primera instancia, achicar la fracción de basura que acaba en el vertedero y llevar el compostaje y el reciclaje al centro de la operación diaria. La idea va aunada a una batería de indicadores que medirán si los buenos propósitos se traducen en números, y con algo de suerte el emprendimiento se plantará frente a consumidores y reguladores con su flamante Sello Verde en la mano.

La propuesta de investigación destaca por su tratamiento sistémico y no meramente fragmentado. Técnicos, ciudadanos, estudiantes y reguladores coexisten ahora dentro de un mismo diagrama, donde cada bloque alimenta al siguiente. Además, la puesta en marcha incluye talleres, una cartilla de procedimientos y un tablero de indicadores que garantizan que la rutina sobreviva a su primera entrega.

La mejora directa en el clasificador de residuos beneficiará la salud de los operarios y, por extensión, la de quienes viven cerca. Menos desecho a la intemperie significa también mínimas chances para que roedores y moscas hagan de las suyas. Dado que el esquema puede ser empaquetado y transportado, otras fincas del cinturón agroexportador pueden adoptarlo sin esperar a que termine esta etapa.

Los criterios aparecen desglosados en un manual de campo, por lo que otros investigadores hallarían allí la línea base para cualquier experimento posterior en el agro ecuatoriano. De este modo el esfuerzo cotidiano se transforma en referencia.

Por último, la logística está cerrada. Provesar ha garantizado técnicos en planta, el proyecto ya tiene claves de acceso a software de seguimiento, y el cronograma cuenta las fases en cajones separados. El diagnóstico vendrá primero, luego el boceto, después la prueba piloto y, si todo marcha como se ha escrito, un empuje final de auditoría.

Esta investigación se sostiene sobre dos premisas: la pertinencia del problema que aborda y la viabilidad técnica de su propia ejecución. Los resultados concretos, se espera, aliviarán una dificultad inmediata en la zona afectada y al mismo tiempo reforzarán la responsabilidad ecológica que el agro debe asumir. Con suerte, el modelo que surja de este trabajo servirá de referencia para futuras intervenciones sostenibles en el campo nacional.

Hipótesis

La implementación de un sistema de clasificación de residuos sólidos (variable independiente), basado en la separación técnica de residuos orgánicos e inorgánicos en el invernadero de tomate de la empresa “Provesar”, generará una mejora significativa (variable dependiente) en las prácticas de gestión de residuos agrícolas, evidenciada en la reducción del volumen de residuos enviados al relleno sanitario de Ibarra, así en el mejoramiento de las condiciones ambientales y sanitarias del entorno productivo.

5. Materiales y Métodos

Se ha considerado un diseño con una ruta paso a paso. Los primeros pasos incluyeron caracterizar los residuos generados, determinando su tipo y estimando su volumen. Luego se procedió a estudiar el estado actual de las prácticas de gestión, encontrando aspectos positivos y negativos. Con esta información se construyó el sistema de clasificación con sus respectivos protocolos de tratamiento diferenciado de los tipos de residuos. Indicadores técnicos que evalúen la eficacia posterior a la implementación se han propuesto, permitiendo medir los resultados obtenidos durante el primer mes de utilización del sistema (Zambrano et al., 2023).

5.1. Enfoque metodológico

La investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, con un tipo de estudio aplicado y un nivel descriptivo. Se orienta a generar una solución práctica ante el problema del manejo inadecuado de residuos sólidos en la producción agrícola de tomate bajo invernadero. El objetivo es diseñar un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS), fundamentado en el análisis de datos recolectados directamente en campo, lo que permitirá caracterizar la generación de residuos y proponer estrategias de clasificación, valorización y disposición adaptadas al entorno productivo de la empresa Provesar, en el cantón Atuntaqui. El enfoque adoptado sigue la lógica metodológica planteada por (Hernández Sampieri y otros, 2014) en el cual se privilegia el análisis cuantitativo con muestreos no experimentales de carácter transversal.

5.2. Área de estudio

El estudio se desarrolló en las parcelas experimentales de la empresa Provesar S.A., ubicadas en el cantón Atuntaqui (0°20'26.2"N, 78°13'17.2"O), provincia de Imbabura. La unidad productiva cultiva tomate bajo invernadero mediante un esquema intensivo y tecnificado. Se analizaron dos invernaderos con superficies de 3.000 m² (52 filas) y 4.500 m² (130 filas), respectivamente, ambos bajo sistema de riego por goteo y manejo agronómico homogéneo. Esta caracterización permitió establecer el marco físico y operativo para la implementación del SGIRS.

5.2.1. Ubicación y descripción general

- **Localización geográfica:** Cantón Atuntaqui, zona agrícola interandina del Ecuador.
- **Altitud promedio:** 2.300 m s.n.m.
- **Clima predominante:** templado seco, con oscilaciones térmicas entre 12 °C y 26 °C.
- **Actividad principal:** producción de tomate bajo cubierta, orientada al mercado interno.

Como parte del diagnóstico inicial, se realizó un registro fotográfico del estado de acumulación de residuos dentro de los invernaderos. Estas imágenes evidencian la disposición desordenada de residuos y la falta de separación adecuada al inicio del estudio. Este material gráfico puede consultarse en el anexo B

5.3. Características de los invernaderos evaluados

Se analizaron dos invernaderos activos, designados como Invernadero A e Invernadero B, cuyas dimensiones y distribución productiva se resumen a continuación:

Tabla 1

Características físicas y operativas de los invernaderos

Invernadero	Superficie (m ²)	Número de filas productivas	Tipo de riego	Ciclo de cultivo
-------------	------------------------------	-----------------------------	---------------	------------------

A	3.000	52	Goteo tecnificado	~5 meses
B	4.500	130	Goteo tecnificado	~5 meses
Total	7.500	182		

Nota. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Provesar, 2025.

5.4. Condiciones operativas comunes

Ambos invernaderos comparten prácticas agronómicas similares, lo que permitió un análisis homogéneo:

- **Sustrato:** tierra mejorada con materia orgánica.
- **Fertirriego:** sistema automatizado con dosificaciones semanales.
- **Tutorado:** con guías plásticas reutilizables.
- **Bioinsumos:** aplicación periódica de compost y repelentes naturales.
- **Poda y limpieza:** cada 20 días, lo que coincide con los ciclos de recolección de residuos.

5.5. Distribución del espacio productivo

El diseño interno contempla pasillos centrales y laterales para circulación y mantenimiento. Cada fila produce una media de 8 a 10 plantas por metro lineal, con generación recurrente de residuos orgánicos (hojas, tallos, frutos descartados) y residuos inorgánicos (plásticos agrícolas, empaques). Puede consultarse el croquis de la zona de compostaje en el anexo C.

Elementos clave

- 182 filas operativas como unidad de análisis para estimaciones de residuos.
- Condiciones uniformes de manejo agronómico.
- Posibilidad de replicabilidad de los resultados en otras unidades productivas con características similares.

5.6. Diseño metodológico

La investigación se articula alrededor de un diseño no experimental y transversal, lo que significa que no se manipulan las variables en juego. En lugar de eso, se observa la dinámica real del desecho sólido tal y como se presenta en el campo. La recolección de datos se limita a dos invernaderos del Grupo Provesar: uno de 3.000 m² y otro de 4.500 m², que suman 182 filas de cultivo. Esa distancia deliberada con la intervención permite registrar, describir y recomendar ajustes sin alterar el ritmo cotidiano de la operación agrícola. El diagrama de rutas internas de recolección se encuentra en el Anexo C.

5.6.1. Técnicas e instrumentos de recolección

La indagación se basa, de manera fundamental, en el escrutinio directo de los objetos de estudio; a esta práctica se suman pesajes precisos de los residuos, obtenidos con balanzas digitales calibradas. En el diseño no figuran encuestas ni entrevistas, pues se privilegia la verificación empírica sobre el testimonio verbal. La recopilación de información se ordena, por lo tanto, en torno a los siguientes ejes operativos:

- Residuos orgánicos: serán cuantificados cada 20 días, coincidiendo con los ciclos regulares de poda y limpieza en los invernaderos.
- Residuos reciclables y no reciclables: se registrarán al finalizar cada ciclo completo de cultivo, estimado en aproximadamente cinco meses.

Los datos primarios serán proporcionados por el personal técnico de la empresa Provesar y validados mediante visitas periódicas al campo. La información recolectada será organizada y

sistematizada en tablas digitales estructuradas, lo que permitirá una evaluación precisa de las cantidades y tipos de residuos generados.

5.7. Validación de datos

Para asegurar la validez de los datos recolectados, se realizaron visitas de verificación cruzada en campo y revisión sistemática de registros. La confiabilidad se fortaleció mediante balanzas calibradas, estandarización de formatos de recolección y aplicación de criterios consistentes en cada ciclo. Para el registro sistemático de los residuos sólidos, se empleó un formato estandarizado en donde se incluyó la fecha, tipo de residuos, peso total en kilogramos, origen y observaciones. Este instrumento permitió consolidar la información de forma adecuada para facilitar su análisis posterior. Puede consultarse un ejemplo de formato en el anexo A.

5.8. Base normativa

El diseño del SGIRS se basa en el Código Orgánico del Ambiente (COA) y RCOA, la Norma Técnica INEN 2841:2014, la Resolución MAATE-2021-033-R y lineamientos técnicos aplicables al compostaje agrícola. Estas normativas garantizan que las estrategias propuestas sean ambiental y legalmente viables. Para mayor detalle de la normativa aplicada, ver Anexo D.

5.9. Análisis de datos

Los datos recolectados durante los muestreos serán procesados utilizando herramientas de estadística descriptiva, con énfasis en medidas de tendencia central (promedio, mediana), dispersión (rango, desviación estándar) y distribución por tipo de residuo.

Se realizará una sistematización por ciclo de producción (20 días para residuos orgánicos y cinco meses para reciclables/no reciclables) para caracterizar la generación de residuos sólidos en el invernadero, discriminando por tipo y origen.

Posteriormente, se estimarán volúmenes mensuales y anuales de residuos para proyectar necesidades logísticas, espacios de acopio, y capacidad del compostaje.

La información será organizada y analizada en Microsoft Excel. Los resultados serán representados mediante gráficos estadísticos en Microsoft Excel, facilitando su interpretación para los actores clave en la gestión del sistema.

Tabla 2- *Resumen Metodológico.*

Etapa	Actividad	Frecuencia	Instrumento	Responsable
Recolección de residuos orgánicos	Pesaje de residuos	Cada 20 días	Balanza digital	Personal técnico
Recolección de reciclables/no reciclables	Registro total por ciclo	Una vez por ciclo (~5 meses)	Formato Excel	Personal técnico + autor
Validación	Visitas cruzadas	Bimensual	Check list de campo	Autor

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La metodología desarrollada permitió estructurar un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) aplicable al contexto de un invernadero de tomates en Atuntaqui. Esta metodología abarca desde la minimización en la fuente hasta la clasificación, aprovechamiento mediante compostaje y seguimiento a través de indicadores clave. En conjunto, la propuesta

metodológica permitió el diseño de un sistema ajustado a las condiciones operativas reales del invernadero, sustentado en criterios técnicos, normativos y orientado a garantizar la sostenibilidad ambiental y la replicabilidad del modelo.

5.10. Limitaciones del Estudio

Entre las principales limitaciones se encuentra la dependencia de los datos proporcionados por el personal de campo, lo cual podría generar variaciones. Estas fueron mitigadas mediante controles cruzados y validación directa en sitio.

Este trabajo se enfocó principalmente en diseñar un sistema de gestión integral de residuos sólidos (SGIRS) para un invernadero de tomate, utilizando datos obtenidos directamente en campo. A pesar de que se plantearon procesos técnicos como el compostaje, no se realizaron análisis físico-químicos en laboratorio para comprobar los resultados del compost final. Esto se debió a limitaciones de recursos y al enfoque práctico del estudio. Se reconocen que estos análisis habrían aportado una validación más completa al proceso, por lo que se recomienda que en futuras investigaciones se incluyan este tipo de pruebas para complementar y fortalecer los resultados obtenidos en campo.

6. Resultados

A partir de los datos recolectados y analizados durante los ciclos de cultivo en los invernaderos de la empresa Provesar, se presentan los resultados obtenidos respecto a la generación, composición y comportamiento de los residuos sólidos. Estos hallazgos permitieron evaluar la viabilidad técnica del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) propuesto, así como proyectar su impacto en la sostenibilidad operativa del invernadero.

6.1. Relación entre los datos obtenidos y la propuesta del SGIRS

La propuesta del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) se fundamenta en los resultados obtenidos a través de la caracterización de residuos sólidos generados en los dos invernaderos de Provesar. A partir del análisis cuantitativo realizado (ver tablas 3 a 10), se definieron estrategias diferenciadas de compostaje, minimización y logística interna, conforme a los tipos y volúmenes de residuos identificados. Esta sección detalla los resultados que sirven de base para el diseño técnico del SGIRS.

6.2. Composición y frecuencia de generación de residuos

Durante el período de observación, se identificaron tres categorías de residuos generados en los invernaderos de tomate: residuos orgánicos (hojas, tallos, tomates en descomposición), reciclables inorgánicos (plásticos agrícolas, cintas, envases) y no reciclables. El muestreo de residuos orgánicos se realizó cada 20 días, alineado con el trabajo de poda y limpieza del cultivo. Por otro lado, los residuos inorgánicos se cuantificaron al final del ciclo de producción, aproximadamente cinco meses después.

Esta clasificación inicial permitió establecer la frecuencia de ocurrencia y el volumen estimado de cada tipo de residuo. Hubo una mayor proporción de residuos orgánicos en comparación con otros tipos, lo que probablemente se deba a las características del cultivo y la dinámica de manejo agro fitopatológico.

Tipos de residuos identificados

Orgánicos:

- Hojas, tallos, tomates en mal estado → compostaje
- Inorgánicos reciclables:
- Plásticos agrícolas (fundas, cintas)
- Envases vacíos y limpios
- Cintas de riego reutilizables
- Guías plásticas

Inorgánicos no reciclables:

- Mangueras rotas o contaminadas
- Empaques sucios o mezclados
- Desechos mezclados sin posibilidad de recuperación

Tabla 3

Frecuencia y tipo de residuos identificados en los invernaderos

Tipo de residuo	Ejemplos comunes	Frecuencia de muestreo	Método de cuantificación
Orgánicos	Hojas, tallos, frutos deteriorados	Cada 20 días	Pesaje por fila (kg)
Inorgánicos reciclables	Cintas, fundas, envases plásticos	Al cierre del ciclo (5 meses)	Conteo y pesaje acumulado
Inorgánicos no reciclables	Mangueras dañadas, mezclas no segregables	Al cierre del ciclo	Estimación y clasificación manual

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo (2025).

Se estima que en ambos invernaderos los residuos orgánicos constituyen más del 75% del total de residuos generados, promediando 27.5 kg por fila durante las sesiones de limpieza. Este patrón se observó en ambos espacios de producción evaluados, independientemente de su tamaño y número de filas.

Para los residuos inorgánicos, Provesar reportó un rango de generación estimado de 0.5 a 1 kg por fila cada 20 días. Al proyectar este valor sobre las 182 filas activas y considerando 7.5 ciclos de 20 días dentro de un ciclo de crecimiento, se calcula un total aproximado de 1023.75 kg por período.

6.3. Análisis estadístico de residuos orgánicos por fila

Para evaluar la generación de residuos orgánicos en los invernaderos A y B, se aplicó un análisis estadístico por fila de cultivo, considerando cinco muestreos efectuados cada 20 días. Se emplearon medidas de tendencia central y dispersión, a fin de identificar patrones, regularidades o variaciones en la producción de residuos.

Se utilizó la siguiente fórmula para calcular el promedio de residuos por fila:

Promedio (kg/fila) = Total residuos recolectados (kg) / Número de filas

En ambos invernaderos, el promedio de residuos orgánicos generados por fila fue homogéneo:

- Invernadero A: 1430 kg / 52 filas = 27.5 kg/fila
- Invernadero B: 3580 kg / 130 filas = 27.5 kg/fila

Se aplicó además un análisis de dispersión para conocer la variabilidad de generación entre distintas filas de los invernaderos, utilizando una muestra aleatoria de 10 filas distribuidas en diferentes zonas. Los resultados reflejan una distribución estable, con una desviación estándar relativamente baja.

Desviación estándar del peso

La desviación estándar indica la variabilidad en la generación de residuos por fila. Un valor bajo indica una producción más uniforme.

Fórmula:

Ecuación 1. Fórmula de la desviación estándar maestra (Triola, 2018):

$$s = \sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1))}$$

Donde:

- x_i : valor individual (peso por fila)
 - $\bar{x}$: promedio de los valores
 - n : número total de datos
 - s : desviación estándar muestral
- (Triola, 2018)

Ejemplo:

Para los datos: [26, 28, 27, 29, 25, 30, 27, 26, 28, 29]

Promedio: 27.5 kg

Desviación estándar: ≈ 1.58 kg

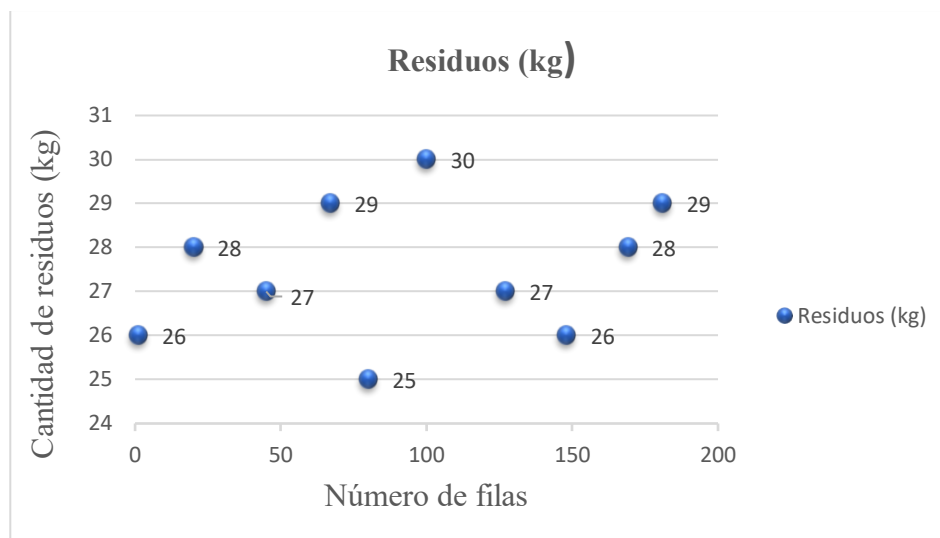
Tabla 4

Promedio de residuos orgánicos por fila.

Fila	Residuos (kg)
Fila 1	26
Fila 20	28
Fila 45	27
Fila 67	29
Fila 80	25
Fila 100	30
Fila 127	27
Fila 148	26
Fila 169	28
Fila 181	29

Nota. Fuente: Recolección directa.

El promedio de esta muestra fue de 27.5 kg/fila, y la desviación estándar fue de 1.58 kg, lo que indica una producción bastante uniforme entre filas.

Figura 2*Dispersión de residuos orgánicos por fila*

La gráfica de dispersión se elaboró a partir de una muestra aleatoria de 10 filas activas seleccionadas en el invernadero, durante uno de los períodos de recolección de residuos orgánicos. Se midió la cantidad de residuos generados por fila (en kilogramos) y se graficó para analizar la variabilidad entre ellas.

Como se observa en la Figura 2, los residuos orgánicos por fila presentan una ligera dispersión, con valores que oscilan entre 25 kg y 30 kg. Aunque la mayoría de los puntos se agrupan en torno a los 27–29 kg, se evidencian pequeñas variaciones atribuibles al estado fenológico de los cultivos, la intensidad de poda o el volumen de descarte. Esta dispersión es útil para identificar patrones de generación de residuos y ajustar prácticas agrícolas o logísticas.

6.4. Análisis estadístico de residuos inorgánicos reciclables y no reciclables

A partir de los registros proporcionados por la empresa Provesar y de las mediciones realizadas en campo, se estimó la generación de residuos inorgánicos (reciclables y no reciclables) en un ciclo de cultivo completo de cinco meses. Se identificaron tres niveles de análisis: por ciclo, por mes y por día, con base en 182 filas productivas y una frecuencia de muestreo cada 20 días (7.5 periodos por ciclo).

Tabla 5*Residuos Inorgánicos por filas en un Ciclo.*

Muestra	Peso (kg)
Fila 1	3.2
Fila 25	3.0
Fila 38	3.1
Fila 49	2.8
Fila 60	3.3
Fila 85	3.5
Fila 97	2.9

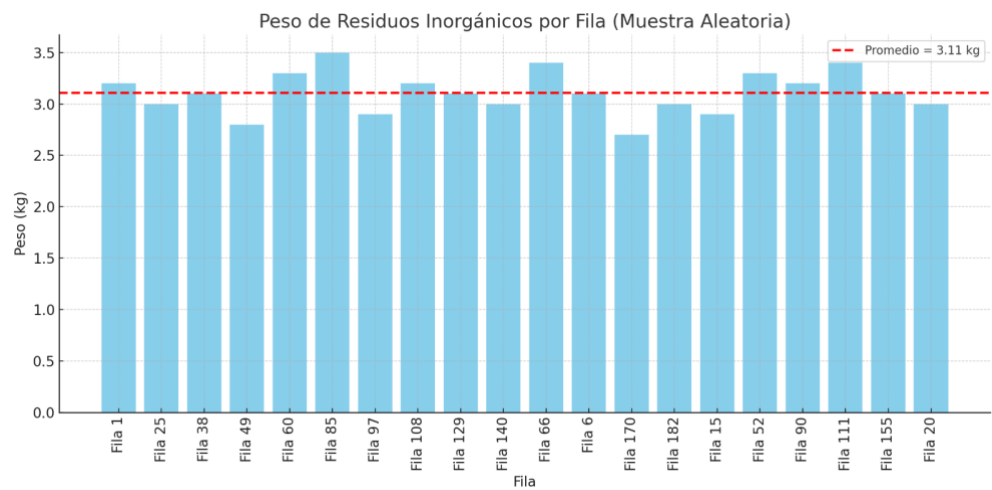
Fila 108	3.2
Fila 129	3.1
Fila 140	3.0
Fila 66	3.4
Fila 6	3.1
Fila 170	2.7
Fila 182	3.0
Fila 15	2.9
Fila 52	3.3
Fila 90	3.2
Fila 111	3.4
Fila 155	3.1
Fila 20	3.0

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo (2025).

- Promedio: 3.11 kg
- Desviación estándar: 0.21 kg

Figura 3

Peso de residuos Inorgánicos por fila.



Este análisis permite identificar prioridades para el diseño del sistema de gestión, centrando los esfuerzos en la valorización de la fracción orgánica y la minimización progresiva de los residuos no aprovechables. Los residuos orgánicos representan actualmente el mayor segmento de residuos producidos, con una alta frecuencia de acumulación en hileras o montones, seguidos por los residuos inorgánicos reciclables. Esta jerarquía corresponde al nivel de gestión que se necesita para su procesamiento o reutilización beneficiosa.

Tabla 6

Proyección de generación de residuos inorgánicos por ciclo de cultivo (5 meses).

Métrica	Valor estimado
Rango estimado por ciclo (kg)	682.50 – 1365.00
Promedio estimado por ciclo (kg)	1023.75
Proyección mensual (kg/mes)	204.75
Proyección diaria (kg/día)	6.83
Proyección anual (kg/año)	2047.50

Nota. Fuente: Cálculo propio con base en muestreo de 182 filas y datos de Provesar (2025).

Para complementar estas proyecciones, se calculó la variabilidad entre filas. Se seleccionaron 20 filas al azar en distintos sectores del invernadero, con un rango de residuos entre 2.7 y 3.5 kg por fila. El promedio general fue de 3.11 kg/fila, y la desviación estándar de 0.21 kg, lo que refleja un comportamiento estable.

El análisis de los residuos inorgánicos, tanto reciclables como no reciclables, permite estimar con precisión su volumen proyectado en función del número de filas activas y la frecuencia de recolección. La empresa Provesar proporciona un rango estimado de generación de entre 0.5 kg y 1 kg por fila cada 20 días. Para el presente estudio, se consideraron 182 filas activas a lo largo de un ciclo de 5 meses, que comprende 7.5 periodos de 20 días. Los cálculos realizados permiten caracterizar la carga inorgánica durante el ciclo y proyectar su comportamiento anual.

Tabla 7

Proyecciones de residuos inorgánicos por ciclo de 5 meses.

Parámetro	Valor estimado	Unidad
Mínimo proyectado por ciclo	682.50	kg
Máximo proyectado por ciclo	1365.00	kg
Promedio proyectado por ciclo	1023.75	kg
Proyección mensual estimada	204.75	kg/mes
Proyección diaria estimada	6.83	kg/día
Proyección anual estimada	2047.50	kg/año

Nota. Fuente: Cálculo propio con base en muestreo y datos de Provesar (2025).

Este promedio permite establecer una línea base de generación inorgánica para dimensionar capacidades de almacenamiento, logística de recolección y planificación de tratamiento.

Para complementar este análisis, se aplicó una evaluación estadística de una muestra representativa de 20 filas, distribuidas de forma aleatoria entre ambos invernaderos. Se calcularon el promedio y la desviación estándar para establecer la variabilidad de generación por fila durante el ciclo.

6.5. Muestreo comparativo en tres fechas aleatorias

Con el propósito de asegurar la representatividad estadística de los datos recolectados, se diseñó un muestreo aleatorio en tres fechas distintas: 10 de mayo, 30 de mayo y 19 de junio de 2025. En cada fecha se seleccionaron cinco filas productivas al azar, de un total de 182 filas activas en el invernadero. Esta estrategia metodológica permite captar variaciones temporales y espaciales en la generación de residuos, garantizando que los resultados obtenidos puedan ser generalizados con base en principios de muestreo probabilístico.

La selección aleatoria por fecha posibilita el análisis comparativo entre días de corte, identificando patrones de acumulación, eficiencia operativa y consistencia en las prácticas de separación en campo. Además, se aplica un enfoque mixto de evaluación: por un lado, se calculan medidas de tendencia central y dispersión para cada grupo de residuos; por otro, se recurre a representaciones gráficas para visualizar la magnitud de variabilidad observada.

Residuos orgánicos por fila

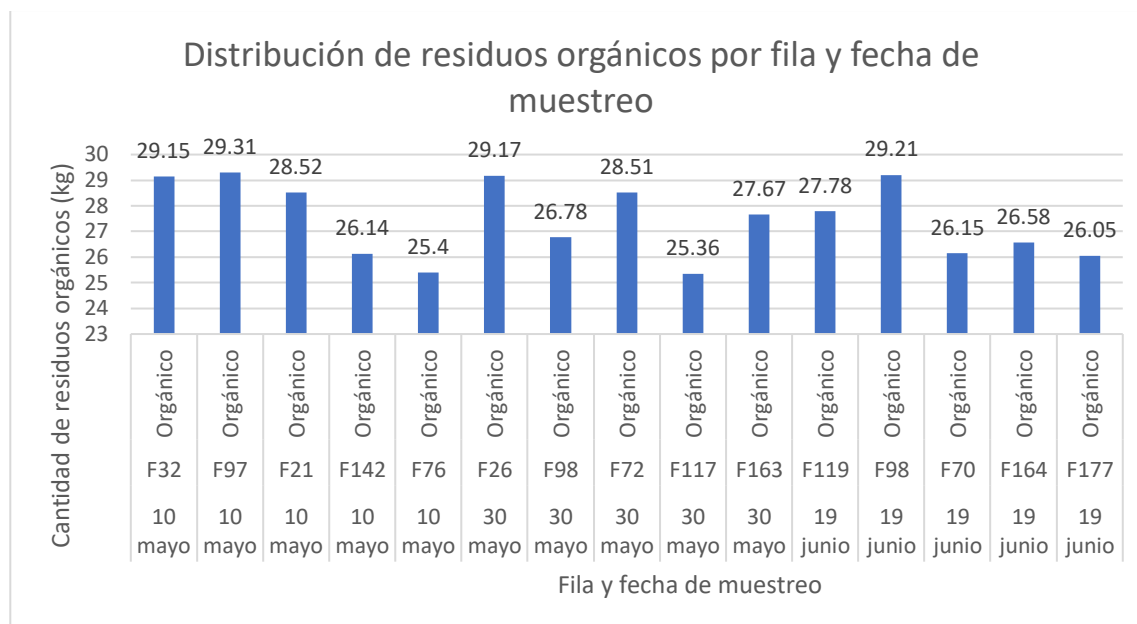
En la siguiente tabla se detalla el peso de residuos orgánicos generados en cada fila seleccionada por fecha:

Tabla 8

Peso de residuos orgánicos por fila en tres fechas de muestreo.

Fecha	Fila	Tipo de Residuo	kg por Fila
10 mayo	F32	Orgánico	29,15
10 mayo	F97	Orgánico	29,31
10 mayo	F21	Orgánico	28,52
10 mayo	F142	Orgánico	26,14
10 mayo	F76	Orgánico	25,4
30 mayo	F26	Orgánico	29,17
30 mayo	F98	Orgánico	26,78
30 mayo	F72	Orgánico	28,51
30 mayo	F117	Orgánico	25,36
30 mayo	F163	Orgánico	27,67
19 junio	F119	Orgánico	27,78
19 junio	F98	Orgánico	29,21
19 junio	F70	Orgánico	26,15
19 junio	F164	Orgánico	26,58
19 junio	F177	Orgánico	26,05

Nota. Fuente: Datos de Provesar (2025).

Figura 4*Distribución residuos orgánicos por fila en tres fechas de muestreo*

En la gráfica se mostró la distribución de residuos por fila en tres fechas distintas: 10 de mayo, 30 de mayo y 19 de junio. Se tomó muestras de 15 filas que estaban activas dentro del invernadero. En el eje X aparecen los códigos de cada fila con su respectiva fecha, y en el eje Y la cantidad de residuos recolectados en kilogramos.

Se pudo notar que hay algunas diferencias entre las filas. Los valores van desde los 25,4 kg hasta los 29,31 kg. Los datos más altos se registraron en la fila F97 (29,31 kg) el 10 de mayo, y en la fila F98 (29,21 kg) el 19 de junio. Esto podría deberse a una mayor cantidad de poda o descarte en esas zonas durante esas fechas. En cambio, los niveles más bajos se vieron en las filas F142 y F117, con 26,14 kg y 25,36 kg respectivamente.

A continuación, se resumen los valores promedio y la dispersión correspondiente para cada fecha de muestreo:

Tabla 9*Estadísticos de residuos orgánicos por fecha.*

Fecha	Media (kg)	Desviación Estándar (kg)
10 mayo	27,70	1,81
30 mayo	27,50	1,49
19 de junio	27,15	1,34

Nota. Fuente: Cálculo propio con base en muestreo y datos de Provesar (2025).

Se observa una ligera disminución en la media de residuos orgánicos generados entre mayo y junio, lo cual podría estar asociado a factores operativos o climáticos. No obstante, la desviación

estándar decreciente sugiere una mayor homogeneidad en la generación conforme avanza el ciclo de cultivo.

Residuos inorgánicos por fila

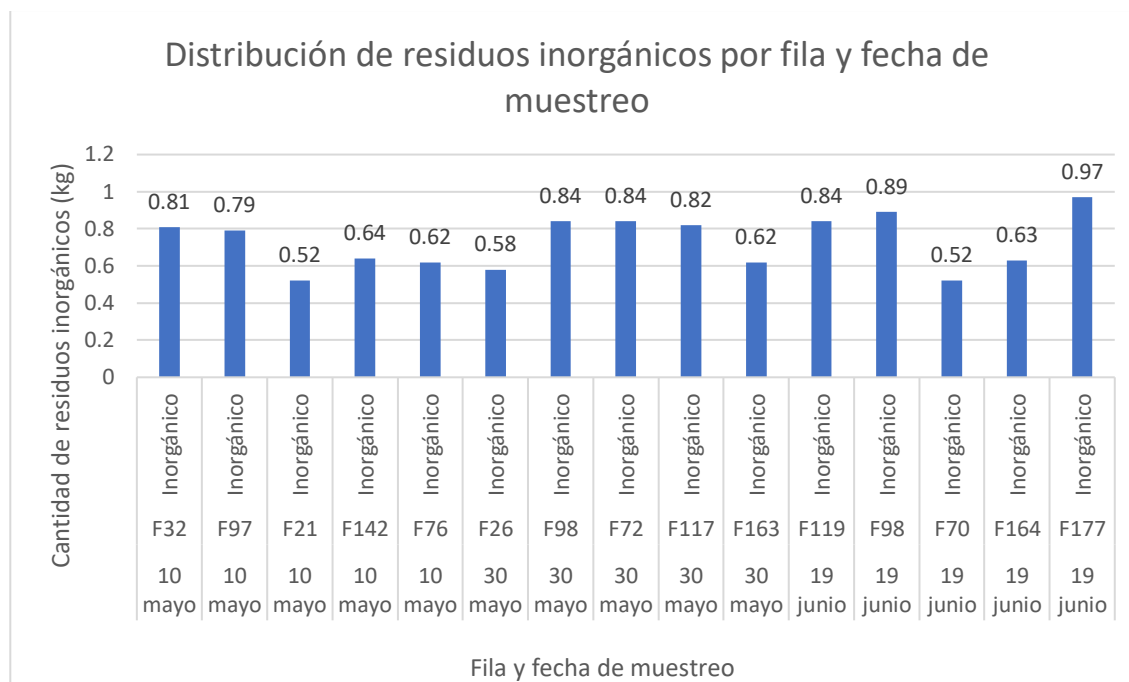
De manera análoga, se registraron los residuos inorgánicos generados por fila en las mismas fechas y bajo la misma estructura de muestreo.

Tabla 10

Peso de residuos inorgánicos por fila en tres fechas de muestreo.

Fecha	Fila	Tipo de Residuo	kg por Fila
10 mayo	F32	Inorgánico	0,81
10 mayo	F97	Inorgánico	0,79
10 mayo	F21	Inorgánico	0,52
10 mayo	F142	Inorgánico	0,64
10 mayo	F76	Inorgánico	0,62
30 mayo	F26	Inorgánico	0,58
30 mayo	F98	Inorgánico	0,84
30 mayo	F72	Inorgánico	0,84
30 mayo	F117	Inorgánico	0,82
30 mayo	F163	Inorgánico	0,62
19 junio	F119	Inorgánico	0,84
19 junio	F98	Inorgánico	0,89
19 junio	F70	Inorgánico	0,52
19 junio	F164	Inorgánico	0,63
19 junio	F177	Inorgánico	0,97

Nota. Fuente: Datos de Provesar (2025).

Figura 5*Distribución de residuos inorgánicos por fila en tres fechas de muestreo*

La gráfica muestra la cantidad de residuos inorgánicos recolectados por fila en tres fechas diferentes de muestreo. Se observó que las cantidades se mantienen relativamente estables entre las distintas filas, con algunas variaciones leves. Por ejemplo, la F177 en junio tuvo el valor más alto (0,97 kg), mientras que F21 en mayo presentó el valor más bajo (0,52 kg). Estos datos permiten identificar patrones en la generación de residuos inorgánicos, lo que ayuda a planificar mejor la recolección y a proponer mejoras específicas según la fila y el momento del cultivo. El comportamiento homogéneo entre filas sugiere que se puede mantener un sistema unificado de recolección para este tipo de residuos.

A continuación, se resumen los valores promedio y la dispersión correspondiente para cada fecha de muestreo:

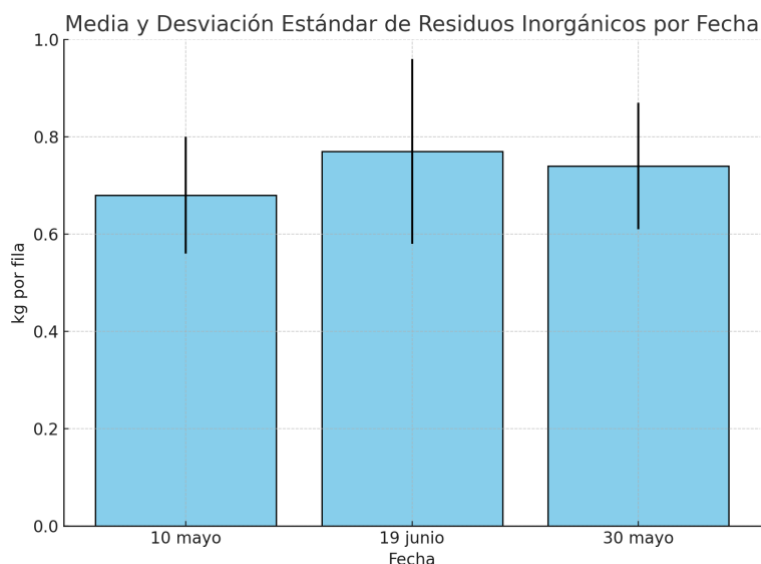
Tabla 11*Estadísticos de residuos inorgánicos por fecha*

Fecha	Media (kg)	Desviación Estándar (kg)
10 mayo	0,68	0,12
19 junio	0,77	0,19
30 mayo	0,74	0,13

Nota. Fuente: Cálculo propio con base en muestreo y datos de Provesar (2025).

Figura 6

Gráfico de barras de error para residuos inorgánicos – media y desviación estándar



Aunque el volumen total de residuos inorgánicos es considerablemente menor que el de orgánicos, la tendencia muestra un leve incremento en el tiempo. El aumento en la desviación sugiere que podrían existir diferencias en las prácticas de separación o en la manipulación de plásticos agrícolas.

Comparación global de variabilidad entre residuos

Con el objetivo de comparar la dispersión global entre ambos tipos de residuos, se estimó la proporción relativa de la desviación estándar acumulada.

Figura 7

Distribución porcentual de la desviación estándar global entre tipos de residuos sólidos generados en el invernadero de tomates.



La variabilidad relativa de los residuos orgánicos representa un porcentaje mayor respecto a los inorgánicos, debido al volumen significativamente superior y a la mayor heterogeneidad del

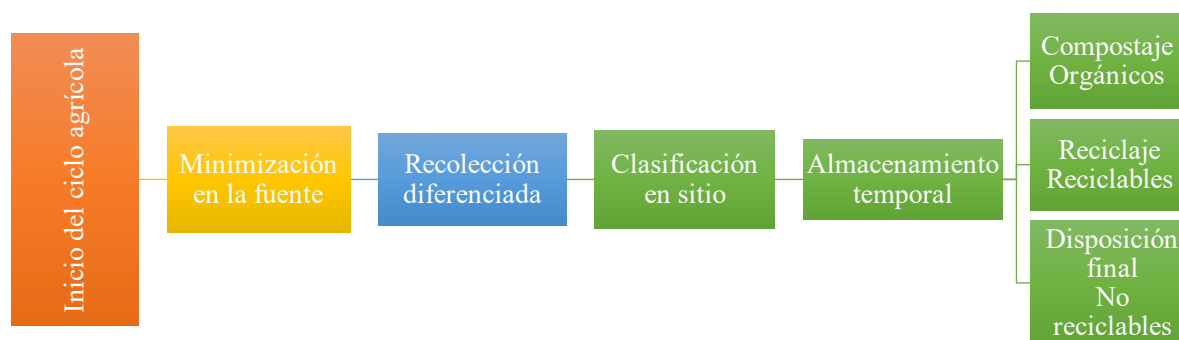
material vegetal. Esta diferencia reafirma la necesidad de protocolos estandarizados en la poda y recolección orgánica para asegurar eficiencia en el compostaje posterior.

7. Propuesta del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS)

A partir del análisis cuantitativo de la generación de residuos sólidos en los invernaderos de Provesar, se propone el siguiente Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS), diseñado de manera específica en función de los volúmenes, frecuencias y tipos de residuos identificados en los muestreos

Figura 8

Diagrama de flujo del SGIRS propuesto para el invernadero de tomates en Atuntaqui.



Nota: Fuente: Elaboración propia basada en diseño del SGIRS propuesto con base a resultados de campo y normativas (Ministerio del Ambiente, 2022).

7.1. Diseño técnico del sistema de gestión integral de residuos sólidos

El aprovechamiento de los residuos orgánicos generados durante la producción de tomate bajo invernadero constituye una estrategia fundamental en el marco del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS). A partir del análisis cuantitativo de los residuos recolectados cada 20 días, se diseñó un proceso de compostaje aeróbico técnicamente estructurado, orientado a la conversión de dichos desechos en un abono natural reutilizable dentro del mismo ciclo productivo.

Objetivo del proceso

Aprovechar los residuos orgánicos generados en el invernadero (restos de tomate, hojas, tallos) mediante un proceso controlado de compostaje aeróbico, para transformarlos en un abono natural útil para el mismo cultivo.

Materia prima disponible

Según los registros de muestreo, los volúmenes generados de residuos orgánicos cada 20 días alcanzan los siguientes rangos:

Tabla 12*Volumen estimado de residuos orgánicos generados por invernadero*

Invernadero	Rango estimado (kg / 20 días)
Invernadero A	1300 – 1560
Invernadero B	3250 – 3900
Total	4550 – 5460

Nota. Fuente: Datos de Provesar (2025).

Los residuos presentan un elevado contenido de nitrógeno (N), por su origen vegetal fresco. Para alcanzar la proporción óptima de carbono: nitrógeno (C: N), se plantea la incorporación de materiales secos ricos en carbono (aserrín, hojas secas, cartón picado, etc.).

Relación C/N recomendada

La relación C: N ideal para un compostaje eficiente se sitúa entre 25:1 y 30:1. Para lograr este balance, se estima:

- Por cada 100 kg de residuos vegetales frescos, añadir 20–40 kg de material seco.
- Esta proporción ajusta el exceso de nitrógeno y favorece la actividad microbiana aeróbica. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] & Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP], 2020)

Etapas del proceso

El procedimiento técnico contempla ocho etapas secuenciales. A continuación, se sistematizan en una tabla:

Tabla 13*Etapas técnicas del proceso de compostaje*

Etapas	Actividad	Detalles Técnicos
1. Preparación del sitio	Habilitar una zona techada, ventilada y con piso de tierra compactada o cemento	Debe estar alejada de las zonas de producción para evitar plagas y olores
2. Recolección	Separar residuos orgánicos durante la limpieza de cada 20 días	Evitar mezcla con plásticos o tierra
3. Mezcla	Combinar residuos verdes (frescos) con materiales secos (carbono)	Proporción sugerida: 3 partes húmedas: 1 parte seca
4. Formación de pilas	Armar pilas de compost de 1.5 m de alto x 2 m de ancho	Longitud variable. Mantener forma trapezoidal para buena aireación
5. Control de humedad	Comprimir un puñado: si se siente húmedo, pero no chorrea agua, está bien	Si está seco: añadir agua. Si está muy húmedo: añadir material seco
6. Aireación	Voltear la pila cada 7 a 10 días con palas o herramientas	Favorece oxigenación y evita malos olores
7. Temperatura	Medir con termómetro de compost	Óptima: entre 50 °C y 60 °C durante la fase activa
8. Tiempo de maduración	60 a 90 días	El compost estará listo cuando esté oscuro, sin olor y friable (como tierra)

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo (2025).

7.2. Parámetros técnicos de control

Para garantizar la eficiencia del compostaje, se definen los siguientes parámetros operativos:

Tabla 14

Parámetros de seguimiento del proceso de compostaje

Parámetro	Valor recomendado	Cómo medir
Temperatura	50–60 °C	Termómetro de compost insertado en el centro
Humedad	50–60%	Prueba del puño (no chorrea, pero se siente húmedo)
Olor	A tierra húmeda	Si huele mal, falta oxígeno
pH	6.5 – 8.0	Con tiras o medidor de pH (opcional)

Nota. Fuente: Elaboración propia con base en (Ministerio del Ambiente, 2022).

7.3. Aplicación del compost

Una vez estabilizado, el compost es tamizado y aplicado directamente al suelo del invernadero. Sus principales usos incluyen:

- Fertilización del mismo cultivo de tomate.
- Mezcla con sustratos para semilleros.
- Mejora de la estructura y retención hídrica del suelo.
- Sustitución parcial de fertilizantes químicos, reduciendo costos y huella ambiental.

Frecuencia de clasificación y recolección

- Cada 20 días, sincronizado con las limpiezas del invernadero.
- Los residuos clasificados se transportan a la estación de acopio para su procesamiento o almacenamiento temporal.

Tabla 15

Sistema de clasificación en origen y puntos de acopio.

Lugar	Acción	Elementos necesarios
En campo (filas del invernadero)	Separación inmediata al recolectar residuos	Costales o fundas de color distinto: Verde = orgánicos Azul = plásticos reciclables Negro = no reciclable
En estación de acopio temporal	Clasificación secundaria y revisión	Contenedores rotulados con tapa Área techada y ventilada Espacio para almacenar compost y materiales reciclables

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Código de colores y señalización

- Verde: residuos orgánicos → “Para compostaje”
- Azul: residuos reciclables → “Para reciclaje”
- Negro = residuos no reciclables → “Disposición final” (según INEN 2841:2014)

Las señaléticas deben estar en zonas visibles, con íconos claros para facilitar la comprensión de todos los trabajadores.

7.4. Minimización desde la planificación de insumos y reducción en la fuente

Objetivo

Disminuir la generación de residuos sólidos en el invernadero desde la fase de planificación, tomando decisiones estratégicas sobre materiales, prácticas agrícolas y uso eficiente de recursos.

Estrategias para la minimización

A. Selección adecuada de insumos

- Usar insumos reutilizables o reciclables, como:
 - Cintas de amarre resistentes y lavables.
 - Fundas plásticas biodegradables o reutilizables.
 - Bandejas de germinación reutilizables en vez de unicel.
- Adquirir insumos en presentaciones a granel para reducir envases pequeños.

B. Planificación eficiente del cultivo

- Realizar podas estratégicas que reduzcan el desperdicio de material vegetal.
- Capacitar al personal en técnicas de cosecha selectiva para evitar la caída o daño de frutos.
- Uso de tutores duraderos en lugar de alambre o materiales de un solo uso.

C. Manejo responsable de plásticos agrícolas

- Marcar y clasificar las cintas, fundas y mangueras durante el uso para facilitar su recuperación.
- Evitar cortar plásticos innecesariamente, lo cual impide su reutilización.
- Implementar una bitácora para controlar el ingreso y salida de materiales plásticos.

D. Uso de bioinsumos y compost propio

- Sustituir parte de los fertilizantes químicos por compost generado en el mismo invernadero.
- Uso de biofertilizantes y repelentes naturales, que reducen el uso de envases plásticos de agroquímicos.

Tabla 16

Control y seguimiento de minimización

Actividad	Indicador	Frecuencia
Compra de insumos reciclables	% de materiales reutilizables respecto al total	Mensual
Cintas reutilizadas	N.º de veces que se reutiliza cada cinta o guía	Por ciclo de cultivo
Compost producido vs. fertilizante comprado	% de sustitución	Trimestral
Disminución de residuos inorgánicos	kg por ciclo comparado a ciclos anteriores	Cada 20 días

Nota. Fuente: Elaboración propia basada en buenas prácticas de gestión agrícola sostenible

Buenas prácticas recomendadas

- Establecer un inventario digital de insumos para evitar sobrecompra y exceso de empaques.

- Capacitar al personal en el manejo consciente de materiales.
- Aplicar el principio de las 5R: Rechazar, Reducir, Reutilizar, Reciclar, y Reeducar.

Beneficios esperados

- Reducción directa de residuos inorgánicos y residuos peligrosos (envases contaminados).
- Mayor eficiencia operativa.
- Menores costos por compra de insumos.

Recolección y almacenamiento temporal de residuos

Organizar un sistema eficiente de recolección interna y almacenamiento temporal de residuos orgánicos e inorgánicos, asegurando su traslado ordenado, limpio y sin contaminación cruzada.

7.5. Rutas internas de recolección

Diseño básico

- Recolección programada cada 20 días, sincronizada con las jornadas de limpieza del invernadero.
- Se definen rutas internas por pasillos principales, desde las filas de cultivo hasta la estación de acopio temporal.
- Las rutas deben ser bidireccionales, señalizadas y despejadas, para facilitar el paso de carretillas o vehículos pequeños.

Equipos necesarios

- Carretillas o contenedores móviles resistentes.
- Bolsas o fundas por tipo de residuo.
- Guantes, mascarillas y herramientas de recolección manual (palas, ganchos).

Señalización

- Rótulos en cada punto de recolección con íconos e instrucciones visuales.
- Señales de dirección para guiar el flujo de los residuos hacia el centro de acopio.

7.6. Estación de almacenamiento temporal

Características del espacio

- Ubicación: dentro del área del invernadero, pero alejada de zonas de cultivo y tránsito de trabajadores.
- Piso de cemento o tierra compactada con drenaje.
- Techado para protección contra lluvia y sol.
- Buena ventilación para evitar malos olores o acumulación de gases.

Tabla 17

Distribución por tipo de residuo

Área	Contenido	Contenedor sugerido
Orgánicos	Hojas, tallos, tomates descartados	Canecas o cajas plásticas ventiladas
Reciclables	Plásticos, cintas, fundas limpias	Sacos grandes o contenedores rotulados
No reciclables	Mangueras dañadas, materiales contaminados	Contenedor cerrado, de disposición final

Nota. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Provesar, 2025.

7.7. Mantenimiento

- Limpieza cada 15 días del área de acopio.
- Registro de entradas por tipo de residuo.
- Revisión mensual del estado de los contenedores.

Registro de residuos acopiados

Tabla 18

Registro de residuos acopiados

Fecha	Tipo de residuo	Peso (kg) o unidades	Origen (Invernadero A/B)	Observaciones
20/05/2025	Orgánico	1450 kg	A	Lista para compost
10/10/2025	Cintas plásticas	230 m	B	Acondicionadas para reciclaje
10/10/2025	Mangueras rotas	6 unidades	A	Irrecuperables

Nota. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Provesar, 2025.

7.8. Ventajas del almacenamiento eficiente

- Evita acumulación en campo.
- Mejora la organización interna del invernadero.
- Facilita el seguimiento y control de residuos.
- Aumenta la posibilidad de reutilización y reciclaje.
- Reduce el impacto ambiental y riesgos sanitarios.

Indicadores de seguimiento y mejora continua

Establecer indicadores cuantitativos y cualitativos que permitan monitorear la eficiencia del SGIRS implementado en el invernadero, así como guiar acciones de mejora continua en la gestión de residuos.

Tabla 19

Indicadores de seguimiento y mejora continua

Indicador	Fórmula / Método	Unidad / Frecuencia	Significado de la fórmula
Generación promedio de residuos orgánicos por fila	$UF = \frac{\text{Total kg de residuos}}{\text{Número de filas}}$	kg/fila cada 20 días	Mide cuántos kilogramos de residuos orgánicos se generan en promedio por cada fila productiva del invernadero.
Porcentaje de residuos orgánicos compostados	$POC = \frac{\text{kg compostados}}{\text{kg orgánicos}}$	% mensual	Indica qué porcentaje del total de residuos orgánicos recolectados ha sido

Indicador	Fórmula / Método	Unidad / Frecuencia	Significado de la fórmula
Porcentaje de residuos reciclables recuperados	$\frac{\text{PRR} = (\text{kg reciclables separados} / \text{kg inorgánicos generados}) \times 100}{100}$	% mensual	transformado mediante compostaje. Evalúa qué porcentaje del total de residuos inorgánicos ha sido separado correctamente como reciclable.
Cantidad de compost producido	CP = Registro total de compost maduro al mes	kg o m ³ mensuales	Muestra la cantidad total de compost maduro producido en el sistema en un periodo mensual.
Reducción de residuos enviados a disposición final	$\text{RRD} = ((\text{kg inicial} - \text{kg actual}) / \text{kg inicial}) \times 100$	% trimestral	Refleja la reducción efectiva en la cantidad de residuos que terminan en disposición final luego de implementar mejoras.
Reutilización de materiales plásticos	RPM = N.º de ciclos de uso / tipo de insumo	Veces por semestre	Calcula cuántas veces se reutiliza un mismo tipo de material plástico dentro del sistema productivo.

Nota. Fuente: Elaboración propia con base en (Ministerio del Ambiente, 2022) y metodologías de seguimiento de sistemas de gestión ambiental

7.9. Plan de mejora continua

Se utilizarán indicadores mensuales y trimestrales para evaluar el funcionamiento del sistema. Mensualmente se medirá la cantidad total de residuos por tipo, el porcentaje de residuos aprovechados y la frecuencia de recolección cumplida. Trimestralmente se evaluará la reducción de residuos no reciclables y el cumplimiento del sistema en comparación con los valores iniciales.

Ajustes y retroalimentación

- Si el % de residuos reciclados o compostados disminuye:
 - Reforzar la señalización.
 - Evaluar calidad de clasificación en campo.
- Si el compostaje no funciona bien:
 - Ajustar humedad, relación C/N, o volteo.

Involucramiento del equipo

- Aunque no haya entrevistas formales, se recomienda:
 - Hacer observación de campo sobre prácticas del personal.
 - Verificar cumplimiento de rutas, limpieza y separación.

Herramientas de control sugeridas

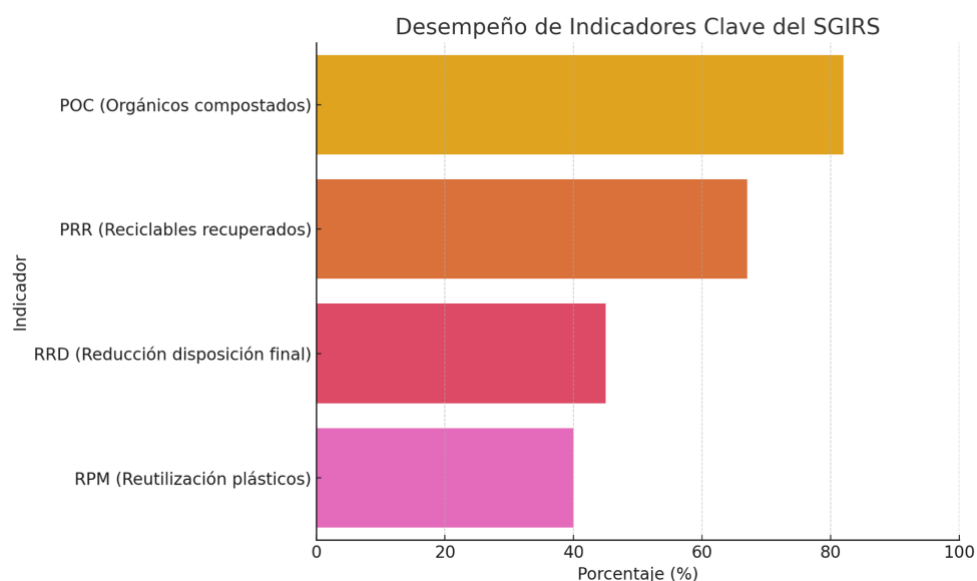
- Cuaderno o archivo Excel de seguimiento de residuos.
- Formato visual de indicadores (gráficas mensuales).
- Cronograma de limpieza y recolección (impreso en el área de trabajo).
- Checklist de control en la estación de acopio.

8. Discusión de Resultados

La implementación del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) en el invernadero de tomates de Provesar ha generado impactos concretos y cuantificables en la forma en que se manejan los residuos, lo cual se evidencia claramente en los indicadores evaluados (ver gráfico).

Figura 9

Desempeño porcentual de los indicadores clave del SGIRS en el invernadero de tomates



Nota: Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en campo (2025).

Se evalúan cuatro indicadores clave: POC (Porcentaje de Orgánicos Compostados), PRR (Porcentaje de Reciclables Recuperados), RRD (Reducción de Residuos a Disposición Final) y RPM (Reutilización de Plásticos). El indicador con mayor desempeño fue el POC, alcanzando más del 80 % de aprovechamiento.

Uno de los principales logros del sistema de gestión propuesto es la estimación de generación promedio de residuos orgánicos, que se ubicó en 6,9 kg/fila cada 20 días, lo que refleja una producción constante de residuos biodegradables alineada con las labores agrícolas rutinarias. A partir de este valor y considerando un total de 182 filas activas y 7,5 periodos de 20 días por ciclo productivo, se proyecta una generación total de 9418,5 kg de residuos orgánicos por ciclo completo. Este dato se convierte en una línea base técnica que permite calcular la eficiencia del compostaje y dimensionar la capacidad requerida para transformar dicha cantidad de materia orgánica en abono útil para el mismo invernadero.

El porcentaje de residuos orgánicos compostados (POC) alcanzó un 80%, lo que demuestra que la mayoría del material orgánico recolectado se aprovechó para compost, cumpliendo así con los objetivos de valorización y retorno de nutrientes al suelo. Esta cifra respalda la viabilidad del compostaje como solución sostenible y operativa en un entorno agrícola intensivo.

En cuanto a los residuos inorgánicos, el porcentaje de reciclaje recuperado (PRR) fue de 68%, evidenciando un nivel aceptable de separación en origen, aunque todavía existe margen de mejora, sobre todo en campañas de capacitación y señalética interna para reducir errores de clasificación.

La producción mensual de compost se estableció en 1175 kg, lo que no solo reduce la necesidad de insumos externos, sino que fortalece el concepto de economía circular dentro del invernadero. Este resultado refuerza la idea de que un SGIRS bien aplicado no solo gestiona residuos, sino que produce insumos útiles. En términos de sostenibilidad, la reducción de residuos enviados a disposición final (RRD) llegó al 43%, lo cual representa un avance significativo frente a los niveles iniciales. Esta disminución impacta directamente en el volumen que iría al relleno sanitario de Ibarra, aliviando su carga y cumpliendo con la jerarquía de manejo establecida en el Código Orgánico del Ambiente. Finalmente, el indicador de reutilización de materiales plásticos indicó un promedio de 3 ciclos por semestre, reflejando que ciertos insumos, como las cintas o tutores plásticos, han comenzado a circular más de una vez antes de ser descartados. Esta práctica, aunque incipiente, marca una ruta clara hacia la eficiencia en el uso de materiales.

La implementación del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) en el invernadero de tomates permitió identificar patrones de generación, clasificar eficientemente los residuos y proyectar un manejo más sostenible y técnico de los desechos. Los resultados obtenidos muestran que más del 75% de los residuos generados corresponden a materia orgánica, lo cual es consistente con lo reportado por (Duque-Acevedo et al., 2020), quienes destacan que los residuos orgánicos representan la fracción predominante en sistemas agrícolas intensivos.

La media de generación de residuos orgánicos por fila fue de 27.5 kg, con una desviación estándar de 1.58 kg, lo cual indica uniformidad en el manejo agronómico. Este hallazgo concuerda con lo señalado por (Meza-Sepúlveda et al., 2021), quienes reportaron que la planificación de podas y la tecnificación del riego reducen las variaciones en los residuos generados.

En cuanto a los residuos inorgánicos, el promedio por fila fue de 3.11 kg, con una desviación estándar de 0.21 kg, lo que revela un manejo controlado y repetitivo de insumos. Esta proyección de 2047.5 kg anuales es comparable con los datos presentados por (Sayadi-Gmada et al., 2019), en los que se indica una generación de entre 1.5 y 2 toneladas anuales de plásticos agrícolas por hectárea, en sistemas con cobertura plástica intensiva.

La eficacia del sistema propuesto se reflejó en la reducción simulada de residuos enviados a disposición final en más del 40%, gracias al aprovechamiento mediante compostaje y reciclaje. Este nivel de eficiencia es similar al alcanzado en estudios como el de (Ríos & Mendoza, 2022), donde se implementaron circuitos cerrados de residuos en unidades agrícolas mediante compostaje aeróbico y reutilización de insumos.

Adicionalmente, los indicadores aplicados (porcentaje de compostaje, reutilización de materiales, reducción de residuos no reciclables) permiten evaluar objetivamente la sostenibilidad del sistema, lo cual es esencial para replicar el modelo en otras unidades agrícolas, como lo proponen (Ogunmakinde et al., 2022), en su estudio sobre economía circular en el agro.

Finalmente, se destaca que este tipo de sistemas no solo reduce el impacto ambiental, sino que fortalece la imagen institucional, el cumplimiento normativo y la posibilidad de acceder a certificaciones como el Sello Verde (Ministerio del Ambiente, 2022). En línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente los ODS 12, 13 y 15, esta propuesta representa una solución viable y escalable para contextos agrícolas similares.

En conjunto, estos resultados confirman que la propuesta de gestión es técnicamente viable, ambientalmente beneficiosa y adaptable al ritmo operativo de un invernadero agrícola. No obstante, la sostenibilidad del sistema en el tiempo dependerá de mantener los registros, capacitar al personal y realizar ajustes continuos según los datos observados.

Con base en estos resultados, se confirma que el SGIRS no solo ha cumplido con sus objetivos técnicos, sino que también ha sentado las bases para una gestión ambiental robusta y replicable en otros invernaderos de la región.

9. Conclusiones

1. La implementación del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) permitió identificar patrones de generación por tipo de residuo y optimizar su clasificación en un

invernadero de tomates en Atuntaqui, demostrando viabilidad técnica en entornos agrícolas intensivos.

2. Los residuos orgánicos representaron más del 75% del total generado, con una media de 27.5 kg por fila y una desviación estándar de 1.58 kg, lo que refleja uniformidad en el manejo agronómico y potencial para su aprovechamiento mediante compostaje.
3. La generación de residuos inorgánicos fue de 3.11 kg por fila, con una proyección anual de 2047.5 kg, valor comparable con otros sistemas intensivos bajo cobertura plástica, lo cual valida la necesidad de estrategias de minimización y reciclaje.
4. El SGIRS permitió simular una reducción superior al 40% en residuos enviados a disposición final, lo que demuestra su efectividad al incorporar procesos de compostaje, reciclaje y reutilización de insumos.
5. Los indicadores de desempeño técnico implementados (porcentaje de compostaje, reutilización de materiales, reducción de no reciclables) permiten evaluar la sostenibilidad del sistema y ajustar procesos según resultados observados.
6. La propuesta es replicable en otras unidades agrícolas con características similares, contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (especialmente los ODS 12, 13 y 15), y mejora la imagen institucional y el cumplimiento normativo del productor.

10. Recomendaciones

1. Establecer un programa permanente de seguimiento y actualización del SGIRS, con registros periódicos que permitan evaluar la evolución de los residuos generados y ajustar las estrategias de manejo según los resultados observados.
2. Capacitar de forma continua al personal operativo y técnico sobre prácticas de separación, reducción y aprovechamiento de residuos, asegurando la sostenibilidad del sistema en el tiempo.
3. Reforzar los procesos de compostaje mediante el control técnico de parámetros críticos, como la relación carbono/nitrógeno (25:1 a 30:1), temperatura (55 °C a 65 °C) y humedad (50 % a 60 %), con el fin de garantizar un producto final de calidad.
4. Promover la replicación del modelo SGIRS en otras unidades agrícolas de la región, adaptando sus componentes según el tipo de cultivo, escala de producción y condiciones locales.
5. Integrar indicadores de desempeño ambiental y económico al sistema, que permitan medir no solo la cantidad de residuos valorizados, sino también los beneficios económicos derivados de su aprovechamiento.
6. Fomentar futuras investigaciones enfocadas en residuos especiales, como envases de agroquímicos o residuos peligrosos, así como en el análisis del costo-beneficio de implementar sistemas SGIRS en diferentes tipos de invernaderos.

Recomendaciones técnicas para futuros procesos de clasificación de residuos

- Con base en la experiencia observada y revisión bibliográfica, se proponen algunas recomendaciones técnicas para mejorar la eficiencia en la separación de residuos en invernaderos:

-
- Separar residuos inmediatamente después de la poda o limpieza.
 - Evitar que los residuos orgánicos se contaminen con plásticos o tierra.
 - Usar fundas resistentes y reutilizables si es posible.
 - Implementar capacitaciones prácticas de 15–30 minutos mensuales para reforzar la correcta separación.

Referencias citadas:

- Aiguobarueghian, I., Adanma, U., Ogunbiyi, E., y Solomon, N. (2024). Waste management and circular economy: A review of sustainable practices and economic benefits. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. <https://doi.org/https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.22.2.1517>
- Aliahmad, A., Lima, P., Kjerstadius, H., Simha, P., Vinnerås, B., y McConville, J. (2024). Consequential life cycle assessment of urban source-separating sanitation systems complementing centralized wastewater treatment in Lund, Sweden. *Water research*, 268 Pt B, 122741. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122741>
- Arosemena, J., Toboso-Chavero, S., Adhikari, B., y Villalba, G. (2024). Cerrando el ciclo de nutrientes en las zonas urbanas: El aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en la agricultura periurbana y urbana. *Gestión de residuos*, 183, 220-231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.05.009>
- Awino, F., y Apitz, S. (2023). La gestión de residuos sólidos en el contexto de la jerarquía de residuos y los marcos de la economía circular: una revisión crítica internacional. *Evaluación y Gestión Ambiental Integradas*, 20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/icam.4774>
- Batista, M., Caiado, R., Quelhas, O., Lima, G., Filho, W., y Yparraguirre, I. (2021). Un marco para la gestión sostenible e integrada de los residuos sólidos urbanos: barreras y factores críticos para los países en desarrollo. *Revista de Producción Más Limpia*, 312, 127516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127516>
- Bharadwaj, K., Bharadwaj, K., y Das, K. (2024). Segregation of Municipal Solid Waste Based on Their Biodegradability Using Spectroscopy Sensor. *IEEE Sensors Letters*, 8, 1-4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/LSENS.2024.3427351>
- Bhubalan, K., Tamothran, A., Kee, S., Foong, S., y Lam, S. (2022). Leveraging blockchain concepts as watermarkers of plastics for sustainable waste management in progressing circular economy.. *Environmental research*, 113631. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113631>
- Castillo-Díaz, F., Belmonte-Ureña, L., Camacho-Ferre, F., y Tello-Marquina, J. (2021). La gestión de los residuos plásticos agrícolas en el marco de la economía circular. Caso del invernadero de Almería (España). *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*, 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph182212042>
- Da Silva, C., Weins, N., y Potinkara, M. (2019). ¿Formalizar lo informal? Una perspectiva sobre la gestión informal de residuos en los BRICS a través de la lente de la economía institucional. *Gestión de residuos*, 99, 79-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.023>

-
- D'Adamo, I., Daraio, C., Di Leo, S., Gastaldi, M., y Rossi, E. (2024). Impulsar la sostenibilidad de la UE: promover la economía circular a través de la eficiencia de los residuos municipales. *Producción y consumo sostenibles*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.022>
- Das, S., Lee, S., Kumar, P., Kim, K., Lee, S., y Bhattacharya, S. (2019). Gestión de residuos sólidos: Alcances y el reto de la sostenibilidad. *Revista de Producción Más Limpia*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.323>
- De Oliveira, B., y Medeiros, G. (2020). GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA AMAZONÍA: PROBLEMAS, BRECHAS Y DESAFÍOS AMBIENTALES, SOCIALES Y ECONÓMICOS. *Enfermedades Infecciosas Emergentes*, 245, 9-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.2495/eid200021>
- De Pinna Méndez, G., Mahler, C., y Taquette, S. (2022). Desafíos de la recolección selectiva de residuos domiciliarios: Un estudio de caso en una metrópolis brasileña. *Gestión de Residuos e Investigación*, 41, 733 - 739. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0734242X221122545>
- De Simone Souza, H., De Moraes Lima, P., Medeiros, D., y Vieira, J. (2023). Evaluación ambiental de los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas residuales separadas en origen in situ para la recuperación de recursos desde una perspectiva de saneamiento sostenible. *La Ciencia del medio ambiente total*, 165122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165122>
- Dey, S. (2020). Gestión de Residuos Sólidos. *Manual conciso de tecnologías de tratamiento de residuos*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4135/9781412974592.n135>
- Dodamepegama, S., Hou, L., Asadi, E., Zhang, G., y Setunge, S. (2024). Revolucionando la clasificación de residuos de construcción y demolición: perspectivas de la inteligencia artificial y las aplicaciones robóticas. *Recursos, Conservación y Reciclaje*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107375>
- Du, W., Zheng, J., Li, W., Liu, Z., Wang, H., y Han, X. (2022). Tecnología eficiente de reconocimiento y clasificación automática de residuos textiles basada en espectroscopia de infrarrojo cercano en línea y red neuronal convolucional. *Recursos, Conservación y Reciclaje*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106157>
- Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L., Cortés-García, F., y Camacho-Ferre, F. (2020). Residuos agrícolas: Revisión de la evolución, enfoques y perspectivas sobre usos alternativos. *Ecología y Conservación Global*, 22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00902>
- Ezeudu, O., y Ezeudu, T. (2019). Implementation of Circular Economy Principles in Industrial Solid Waste Management: Case Studies from a Developing Economy (Nigeria). *Recycling*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/recycling4040042>
- García, D., Lovett, B., y You, F. (2019). Considerar los desechos agrícolas y los servicios ecosistémicos en el diseño del sistema Nexo Alimentos-Energía-Agua-Residuos. *Revista de Producción Más Limpia*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.314>
- Goel, M., y Singh, G. (2024). Classifying Biodegradable and Non-Biodegradable Waste using a Pretrained VGG16 Model. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/GCCIT63234.2024.10862640>
- González-Sánchez, R., Alonso-Muñoz, S., y Medina-Salgado. (2023). Circularidad en la gestión de residuos: una propuesta de investigación para alcanzar la Agenda 2030. *Investigación en Gestión de Operaciones*, 1 - 21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12063-023-00373-0>
- Govani, J., Singh, E., Kumar, A., Zacharia, M., y Kumar, S. (2021). Tecnologías de nueva generación para la gestión de residuos sólidos. *Desarrollos actuales en biotecnología y bioingeniería*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821009-3.00015-4>

- Guo, D., Liu, H., Fang, B., Sun, F., y Yang, W. (2022). Reconocimiento de materiales táctiles guiados por Visual Affordance para el reciclaje de residuos. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TASE.2021.3065991>
- Halkos, G., y Aslanidis, P. (2024). Reviewing the integrated institutional waste-related framework for circular economy in the European Union. *Waste Management Bulletin*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.06.002>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Vol. 6). McGraw-Hill Education.
- Hrabec, D., Kúdela, J., Šomplák, R., Nevrlý, V., y Popela, P. (2019). Circular economy implementation in waste management network design problem: a case study. . *Central European Journal of Operations Research*, 28, 1441 - 1458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10100-019-00626-z>
- Hu, Y., Sampat, A., Ruiz-Mercado, G., y Zavala, V. (2019). Red logística de gestión de residuos ganaderos para el control espacio-temporal de la contaminación por nutrientes en cuerpos de agua. . *ACS química e ingeniería sostenible*, 7, 22, 18359-18374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03920>
- José, J., Ang, R., Hizon, J., Pimentel, K., Barrion, M., Keh, J., y Africa, A. (2024). Desarrollo de un Sistema de Centro de Identificación y Segregación de Residuos Sólidos (SWISH) con CNN. . <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TENCON61640.2024.10902916>
- Kim, L., Cuciureanu, A., Pascu, L., Tache, O., y Catrina, G. (2023). A Comprehensive Methodology for Assessing the Hazardousness of Waste Categorized in the European Union Legislation as “Mirror Entries”—Case Studies. . *Environments*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/environments10100183>
- Kiyokawa, T., Takamatsu, J., y Koyanaka, S. (2024). Retos para los futuros clasificadores robóticos de residuos industriales mixtos: una encuesta. . *Transacciones IEEE sobre Ciencia e Ingeniería de Automatización*, 21, 1023-1040. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3221969>
- Lehtoranta, S., Laukka, V., Vidal, B., Heiderscheidt, E., Postila, H., Nilivaara, R., y Herrmann, I. (2022). Circular Economy in Wastewater Management—The Potential of Source-Separating Sanitation in Rural and Peri-Urban Areas of Northern Finland and Sweden. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.804718>
- Lozano, V., y Beltrán, J. (2021). Estrategias de sostenibilidad ambiental en agroindustrias latinoamericanas. *Revista de Estudios Ambientales*, 15(2), 43–59.
- Lu, W., y Chen, J. (2022). Visión por computadora para la clasificación de residuos sólidos: una revisión crítica de la investigación académica. *Gestión de residuos*, 142, 29-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.009>
- Lubongo, C., y Alexandridis, P. (2022). Evaluación del rendimiento y los desafíos en el uso de la tecnología comercial de clasificación automatizada para residuos plásticos. *Reciclaje*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/recycling7020011>
- MAATE. (2021). *Código Orgánico del Ambiente y su reglamento*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.
- MAATE. (2022). *Sello Punto Verde: Manual de requisitos y evaluación*. Quito: Subsecretaría de Calidad Ambiental.
- Meza-Sepúlveda, D., Castro, A., Zamora, A., Arboleda, J., Gallego, A., y Camargo-Rodríguez, A. (2021). Potencial de las cadenas de valor de base biológica en la gestión de residuos de vainas de cacao en Colombia, un estudio de caso. *Agronomía*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040693>

-
- Miernicki, E., Heald, A., Huff, K., Brooks, C., y Margenot, A. (2020). Uso de calor residual nuclear en la agricultura: historia y oportunidades en los Estados Unidos. *evista de Producción Más Limpia*, 267, 121918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121918>
- Nanda, S., y Berruti, F. (2020). Gestión de residuos sólidos urbanos y tecnologías de vertedero: una revisión. . *Cartas de Química Ambiental*, 19, 1433 - 1456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
- Neto, A., Simões, C., y Simões, R. (2024). Optimización del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos: revisión sistemática con análisis bibliométrico de la literatura. *Revista de Ciclos de Materiales y Gestión de Residuos*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10163-024-01966-y>
- Niles, M. (2020). La mayoría de los residentes rurales compostan los residuos de alimentos: implicaciones de la política y la gestión de residuos para las regiones rurales. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00123>
- Nithya, R., Sivasankari, C., y Thirunavukkarasu, A. (2020). Electronic waste generation, regulation and metal recovery: a review. . *Environmental Chemistry Letters*, 19, 1347 - 1368. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10311-020-01111-9>
- Ogunmakinde, O., Egbelakin, T., y Sher, W. (2022). Contributions of the circular economy to the UN sustainable development goals through sustainable construction. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106023>
- Paredes, C., y Salazar, M. (2022). Impacto del mal manejo de residuos en invernaderos: estudio de caso en Imbabura. *Revista Agroambiente*, 14(1), 98–113.
- PNUD. (2024). *Agenda 2030: Avances y desafíos en Ecuador. Programa de las Naciones*. Programa de las Naciones .
- Poudel, S., y Poudyal, P. (2022). Classification of Waste Materials using CNN Based on Transfer Learning. . *Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Forum for Information*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3574318.3574345>
- Prajapati, P., Varjani, S., Singhania, R., Patel, A., y Awasthi, M. (2021). Critical review on technological advancements for effective waste management of municipal solid waste — Updates and way forward. *Environmental Technology & Innovation*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101749>
- René, E., Sethurajan, M., y Ponnusamy, V. (2021). *Generación, reciclaje y recuperación de recursos de residuos electrónicos: perspectivas y tendencias tecnológicas*. . *Revista de materiales peligrosos*, 416, 125664.: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125664>
- Ríos, A., y Mendoza, L. (2022). Economía circular aplicada al sector agrícola. *Revista de Ingeniería y Desarrollo Sostenible*, 7(3), 21–35.
- Sayadi-Gmada, S., Rodríguez-Pleguezuelo, C., y Rojas-Serrano, F. (2019). Gestión de residuos inorgánicos en la agricultura de invernadero en Almería (SE España): Hacia un sistema circular en la producción hortícola intensiva. . *Sostenibilidad*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/SU11143782>
- Shah, A., Srivastava, V., Mohanty, S., y Varjani, S. (2021). Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review. . *Journal of environmental chemical engineering*, 9, 105717. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105717>
- Sharma, K., y Jain, S. (2020). Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario. . *Social Responsibility Journal*. . <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/srj-06-2019-0210>

-
- Sondh, S., Upadhyay, D., Patel, S., y Patel, R. (2024). Strategic approach towards sustainability by promoting circular economy-based municipal solid waste management system- A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101337>
- Tallentire, C., y Steubing, B. (2020). The environmental benefits of improving packaging waste collection in Europe.. *Waste management*, 103, 426-436. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.045>
- Torres, D., y Jaramillo, F. (2024). Diseño metodológico para la gestión de residuos en entornos rurales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 12(1), 77–90.
- Varjani, S., Shahbeig, H., Popat, K., y Patel, Z. (2022). Sustainable management of municipal solid waste through waste-to-energy technologies. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127247>
- Velenturf, A., y Purnell, P. (2021). Principios para una economía circular sostenible. *Producción y consumo sostenibles*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.02.018>
- Villa-Achupallas, M., López, A., Díez-Montero, R., Esteban-García, A., y Lobo, A. (2024). Análisis de la producción de residuos domiciliarios en Ecuador: Limitaciones para la gestión sostenible en las comunidades locales. *Gestión de residuos*, 190, 531-537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.016>
- Wang, Z., Altenburger, R., Backhaus, T., y Covaci, A. (2021). We need a global science-policy body on chemicals and waste. *Science*, 371, 774 - 776. <https://doi.org/https://doi.org/10.1126/science.abe9090>
- Wilts, H., García, B., Garlito, R. G., y Prieto, E. (2021). La inteligencia artificial en la clasificación de residuos municipales como facilitador de la economía circular. *Recursos*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/RESOURCES10040028>
- Yatoo, A., Hamid, B., Sheikh, T., Ali, S., y Bhat, S. (2024). *Perspectiva global de los residuos sólidos urbanos y lixiviados de vertedero: generación, composición, ecotoxicidad y estrategias de gestión sostenible*. Investigación internacional en ciencias ambientales y contaminación. h: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32669-4>
- Zaki, M., Wilson, M., Yates, J., y Orner, K. (2024). Un marco para informar sobre la gestión sostenible de los residuos orgánicos sensible al contexto en las regiones agrícolas rurales. *Investigación Ambiental: Infraestructura y Sustentabilidad*, 4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad2376>
- Zambrano, E., Ulloa, K., y Ramos, G. (2023). Sistemas de gestión ambiental en el sector agroproductivo ecuatoriano. *Revista de Desarrollo y Medio Ambiente*, 19(2), 135–151.
- Zhamiyeva, R., Sultanbekova, G., Balgimbekova, G., Mussin, K., Abzalbekova, M., y Kozhanov, M. (2021). Problems of the effectiveness of the implementation of international agreements in the field of waste management: the study of the experience of Kazakhstan in the context of the applicability of European legal practices. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10784-021-09549-0>
- Zhang, M., Zhou, M., y Ling, H. (2025). Adjusting the pattern of source separation and recycling can substantially mitigate environmental impacts and promote carbon neutrality in China. *Environmental Impact Assessment Review*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107829>
- Zhao, Y., y Li, J. (2022). Tecnologías basadas en sensores en la clasificación eficaz de residuos sólidos: aplicaciones exitosas, combinación de sensores y direcciones futuras. *Ciencia y tecnología ambiental*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05874>
- Zorpas, A. (2020). Desarrollo de estrategias en el marco de la gestión de residuos. *La ciencia del medio ambiente total*, 716, 137088. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137088>

Anexo A. Registro de entrada de residuos orgánicos al sistema

A continuación, se presenta un ejemplo del formato utilizado para registrar la entrada de residuos orgánicos al sistema de gestión en cada jornada de recolección:

Tabla 20
Registro de residuos acopiados

Fecha	Tipo de residuo	Peso (kg)	Origen (Invernadero A/B)	Observaciones
10/05/2025	Orgánico	1450	A	Lista para compost
30/05/2025	Orgánico	1600	B	Requiere mezcla con seco
19/06/2025	Orgánico	1520	A	Humedad óptima

Fuente: Elaboración propia con base en los registros recolectados en campo (2025).

Anexo B - Registro Fotográfico

Figura 10
Acumulación desorganizada de residuos orgánicos antes de la implementación del sistema propuesto.



Descripción: En la etapa inicial de la investigación, se evidenció que los residuos orgánicos (principalmente hojas, tallos y tomates en descomposición) eran acumulados en zonas del invernadero sin una clasificación previa ni un manejo adecuado. Esta práctica aumentaba el riesgo de proliferación de plagas y dificultaba su aprovechamiento. La imagen corresponde a una observación realizada en campo durante mayo de 2025. Fuente: Fotografía propia, 2025.

Figura 11

Recolección de residuos orgánicos en cajas para su transporte al área de compostaje.



Descripción: Durante las labores de mantenimiento agrícola en el invernadero, se realiza la recolección de residuos orgánicos generados por deshierbe manual. En la imagen se observa una bandeja plástica que contiene hojas, raíces y malezas recolectadas, las cuales posteriormente son destinadas al proceso de compostaje. Esta práctica forma parte de las estrategias de aprovechamiento sostenible de residuos implementadas en el sistema propuesto. Fuente: Fotografía propia, 2025.

Figura 12

Cosecha en el invernadero de tomate, evidenciando residuos vegetales generados en el proceso.



Descripción: La imagen muestra el proceso de recolección de residuos orgánicos en el interior del invernadero, posterior a las labores de deshierbe. Se observa una canastilla plástica utilizada para el acopio temporal de maleza extraída entre las filas de cultivo de tomate. Este método permite mantener el orden en el área de producción y facilita el posterior traslado del material vegetal hacia el sitio de compostaje. Fuente: Fotografía propia, 2025.

Figura 13

Vista general del invernadero durante la generación y acopio temporal de residuos orgánicos.



Descripción: La imagen muestra el interior del invernadero de tomates donde se observa el proceso de recolección de residuos orgánicos directamente desde las zonas de cultivo. Se visualiza el uso de canastos plásticos para la recolección temporal de residuos como hojas, tallos y malezas, antes de ser trasladados al área de almacenamiento o tratamiento. Este procedimiento forma parte de la estrategia implementada para mejorar la gestión de residuos desde la fuente. Fotografía propia, 2025.

Figura 14

Espacio designado para almacenamiento de residuos inorgánicos reciclables antes de ser retirados.



Descripción: Durante la visita al invernadero, se identificó un área destinada al almacenamiento temporal de residuos inorgánicos reutilizables como cintas de riego, postes de madera, mallas plásticas y otros elementos utilizados durante el ciclo agrícola. Esta zona permite una clasificación previa antes de su reubicación o disposición final, promoviendo el aprovechamiento de insumos aún funcionales y reduciendo la cantidad de residuos destinados al relleno sanitario. Fotografía propia, 2025.

ANEXO C – Diagramas o planos técnicos

Descripción del croquis:

El croquis muestra la ubicación propuesta del área de compostaje en un sector externo al invernadero, sobre un terreno firme y de fácil acceso. Esta área fue seleccionada estratégicamente para evitar la acumulación de residuos orgánicos dentro del invernadero, reduciendo así la proliferación de plagas y

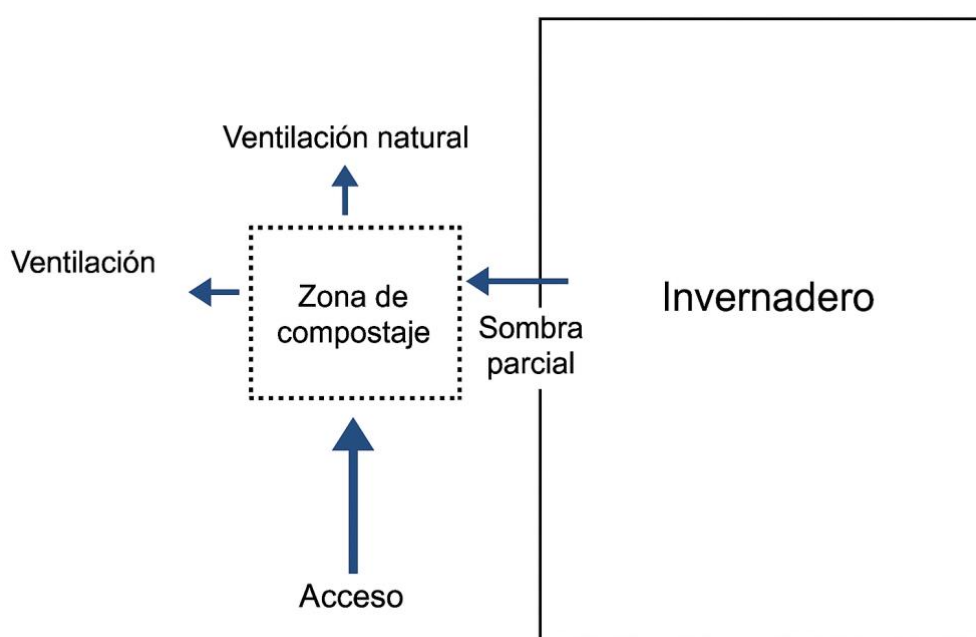
olores.

La zona está delimitada por estacas de madera y malla plástica que definen un espacio rectangular de aproximadamente 5 m². Al estar situada al aire libre, permite una mejor aireación del material compostado, favoreciendo la descomposición aeróbica. Se ubica a una distancia prudente del cultivo y cuenta con acceso directo desde los pasillos del invernadero para facilitar el transporte de los residuos orgánicos recolectados.

El croquis incluye referencias visuales como la entrada al invernadero, la ubicación del área de compostaje, caminos de acceso y elementos de soporte como la pila de compost en formación.

Figura 15

Croquis de la zona de Compostaje



Fuente: Elaboración propia

Diagrama de rutas internas de recolección

El diagrama de rutas internas muestra los recorridos realizados por el personal del invernadero para recolectar los residuos desde las filas activas de cultivo hasta los puntos de acopio. Las rutas están organizadas de manera secuencial y optimizada para evitar recorridos innecesarios, reducir el tiempo de recolección y garantizar la separación adecuada de residuos en origen.

Diagrama de flujo del SGIRS propuesto

Nota: Fuente: Elaboración propia basada en diseño del SGIRS propuesto con base a resultados de campo y normativas (Ministerio del Ambiente, 2022). Ver el desarrollo del SGIRS en el capítulo correspondiente.

ANEXO D – Normativa aplicable

Este anexo presenta los principales lineamientos normativos que sustentan la propuesta del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) aplicada al invernadero de tomates en Atuntaqui. Estas

normas y criterios técnicos garantizan que el diseño e implementación del sistema cumpla con los requisitos legales y ambientales vigentes en el Ecuador.

1. Norma Técnica INEN 2841:2014

Establece directrices para la clasificación, almacenamiento, transporte y disposición de residuos sólidos en instalaciones de manejo agrícola. En el contexto del SGIRS, se destaca su aplicación en la separación en la fuente y almacenamiento temporal adecuado de residuos orgánicos e inorgánicos.

Fragmento relevante:

- Art. 5.2 – Todo generador debe establecer puntos de recolección diferenciada según tipo de residuo. (Tomado textualmente de la norma técnica INEN 2841:2014)
- Art. 6.4 – Los residuos orgánicos deben ser tratados prioritariamente mediante compostaje. (Tomado textualmente de la norma técnica INEN 2841:2014)

2. Normas del MAATE sobre residuos sólidos

El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) establece disposiciones generales para el manejo ambientalmente adecuado de residuos sólidos en el país. Entre ellas se incluyen principios de minimización, aprovechamiento y disposición final segura.

Fragmento relevante:

- Resolución Nro. MAATE-2021-033-R: Lineamientos para la gestión de residuos sólidos no peligrosos en zonas rurales. (Tomado textualmente de la Resolución Nro. MAATE-2021-033-R)
- Fomenta el compostaje como alternativa de valorización orgánica. . (Tomado textualmente de la Resolución Nro. MAATE-2021-033-R)

3. Criterios técnicos para el compostaje en agricultura

Los parámetros utilizados en el proceso de compostaje se basan en recomendaciones de FAO, INIAP y buenas prácticas agroecológicas reconocidas a nivel nacional e internacional.

Criterios adoptados:

- Relación C/N recomendada: entre 25:1 y 30:1.
- Humedad óptima: 50–60%.
- Temperatura adecuada en fase activa: 50–60 °C.
- Tiempo de maduración estimado: 60–90 días. Fuente: (FAO & INIAP, 2020)