OPEN ACCESS

ARTÍCULO ORIGINAL

Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 35
enero-diciembre 2026
ISSN 1010-2760, eISSN 2071-0054
Cu-ID: https://cu-id.com/2177/v35e19

Procedimiento para implementar una minibiofactoría de bioinsumos en la biotecnología circular en fincas de Mayabeque

Procedure for Implementing a Minibiofactory of Bioinputs in Circular Biotechnology on Farms in Mayabeque

Mayra Arteaga Barrueta[1*] and José Antonio Pino Roque[2]

[1]*Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Agronomía, Departamento de Química, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.*
[2]*Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Matemáticas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. E-mail: pino@unah.edu.cu*

[*]Autora para correspondencia: Mayra Arteaga Barrueta, e-mail: mayra@unah.edu.cu

RESUMEN: La autonomía agrícola de las fincas constituye un reto clave en el desarrollo local para mitigar la dependencia de insumos externos, especialmente en suelos degradados y con impacto ambiental. Una solución alternativa es la implementación de un modelo cíclico que aproveche integralmente los residuos endógenos, centrado en una minibiofactoría de bioinsumos para transformar desechos orgánicos en insumos biológicos de alto valor agronómico. El objetivo es proponer una metodología integral, adaptable y replicable para diseñar una minibiofactoría que contribuya a la autonomía de la finca Guayabal y sirva de modelo para la localidad de Mayabeque. Se validaron y adecuaron metodologías de la literatura a las condiciones endógenas de la finca Guayabal para la implementación de una minibiofactoría como alternativa emergente para el manejo sostenible de residuos. Estas se adecuaron a las condiciones endógenas de la finca Guayabal, seleccionada como centro de estudio por su articulación entre actores en actividades productivas, docentes, investigativas y de capacitación local. Con este diseño, se estimó una autosuficiencia en la obtención de bioinsumos del 162%, un retorno de la inversión en 16 meses y una mejora proyectada de la materia orgánica del suelo del 1.55 a 4% en 3 años. Estos resultados sugieren la viabilidad de su implementación y el aumento de la resiliencia, convirtiendo el modelo en un referente de autosostenibilidad cíclica con recursos propios. Estas proyecciones teóricas, que requieren validación empírica en etapas posteriores, no solo definen el carácter pionero del trabajo, sino que también sientan las bases metodológicas para futuras implementaciones de minibiofactorías en el territorio.
Palabras clave: agroecología, sostenibilidad, ciclo de flujos de nutrientes, reciclaje de residuos.

ABSTRACT: Agricultural autonomy on farms is a key challenge for local development, mitigating dependence on external inputs, especially in degraded soils with environmental impact. A potential solution involves implementing of a cyclical model that fully utilizes endogenous waste, centered on a mini-biofactory for bio-inputs to transform organic waste into biological inputs of high agronomic value. The objective is to propose a comprehensive, adaptable, and replicable methodology for designing a mini-biofactory that contributes to the autonomy of the Guayabal farm and serves as a model for the Mayabeque region. Methodologies from the literature were validated and adapted to the endogenous conditions of the Guayabal farm for the implementation of a mini-biofactory as an emerging alternative for the sustainable management of waste. These methodologies were adapted to the specific conditions of the Guayabal farm, selected as the study center due to its integration of stakeholders in local production, teaching, research, and training activities. With this design, a self-sufficiency of 162% in obtaining bio-inputs was estimated, along with a return on investment in 16 months and a projected improvement in soil organic matter from 1.55% to 4% over 3 years. These results suggest the feasibility of its implementation and the increase in resilience, making the model a benchmark for cyclical self-sustainability using local resources. These theoretical projections, which require empirical validation in subsequent stages, not only define the pioneering nature of the work but also lay the methodological groundwork for future implementations of mini-biofactories in the region.
Keywords: Agroecology, Sustainability, Nutrient Cycling, Waste Recycling.

INTRODUCCIÓN

La creación de modelos sostenibles para fincas locales basados en los principios de la agricultura circular, constituye un reto actual. Estos modelos, imitan los ciclos naturales mediante prácticas cíclicas como el reciclaje de biomasa y el uso de bioinsumos (Altieri, 2002), buscando reducir la huella ecológica mediante la conservación y protección de la biodiversidad, el suelo y las aguas (Gliessman, 2018); así como la eficiencia energética con recursos renovables (FAO, 2018).

Recibido: 15/11/2025
Aceptado: 27/04/2026
Conflicto de interés: los autores declaran que no existen conflicto de interés.
Contribuciones de autor: Conceptualización. Curación de datos. Investigación. Metodología. Validación. Redacción-borrador original: Mayra Arteaga. **Supervisión:** José Pino. **Análisis formal Redacción-revisión y edición:** Mayra Arteaga. José Pino.
La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos, ni para los autores ni para el editor

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

En Cuba, existen investigaciones sobre el cierre de ciclos de nutrientes en estudios con matices específicos, aislados y mixtos. Se destacan: modelos en pastizales, eficiencia en condiciones climáticas favorables (Funes-Monzote, 2008); biofábricas operativas (CREE, producción local de compost, bocachi, violes, purines vegetales y hongos *Trichodermas*); aunque con distribución y escalado desigual no generalizada (Rosset *et al.*, 2011). Además, persisten desafíos logísticos y efectos climáticos que limitan la calidad de los residuales (Machado *et al.*, 2017), que repercuten en la inconsistencia en la calidad de los bioinsumos artesanales por infraestructura limitada y la falta de difusión masiva de prácticas agrícolas cíclicas de campesino a campesino (Fundora *et al.*, 2024).

No obstante, estos antecedentes muestran resultados en la mejora de suelos, cultivos, biodiversidad y reducción de la contaminación sirviendo de base para implementar minibiofactorías de bioinsumos como eje de la agricultura circular en la autogestión en fincas locales.

La finca Guayabal como modelo docente-productivo-investigativo, constituye un escenario idóneo para replicar los aciertos cubanos y minimizar los desaciertos, mediante la validación y adaptación de la metodología referidas por Arteaga & Pino (2025), a las condiciones endógenas de las fincas. En el presente trabajo se tuvo como objetivo proponer una metodología integral, adaptable y replicable para diseñar una minibiofactoría que contribuya a la autonomía de la finca Guayabal y sirva de modelo para la localidad de Mayabeque.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño metodológico general

El procedimento de trabajo se fundamentó en la vinculación, validación y adactación de dos metodologías propuestas para el diseño de implementación de minibiofactorías de bioinsumos agrícolas en fincas locales, específicamente en la provincia Mayabeque, planteadas por Arteaga y Pino (2025).

Se derivó un procedimiento de acuerdo a las características y condiciones endógenas de la finca docente Guayabal. Se desarrolló con un enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo) y se estructuró como un estudio de caso único (Yin, 2014) con elementos de investigación-acción participativa integrado al conocimiento de los actores locales de la finca Guayabal, análisis de laboratorio y modelación técnico-económica.

Este protocolo se articuló metodológicamente integrando indicadores que permitieran el carácter multifunicional requerido, para lograr una continua mejora de las acciones integradas estratégicas endógena a desarrollar a través de vías con mínimo costo y más viables para la implementación gradual (escalonada) y la instauración final de Minibiofactorías Circulares Autosostenibles en fincas a nivel individual o comunitario, bajo las condiciones endógenas locales de la provincia Mayabeque extendibles a Cuba, para contribuir a la soberanía alimentaria y sostenibilidad ambiental del territorio.

El diseño metodológico general contempló tres fases secuenciales: (I) Fase 1. Caracterización de la finca y diagnóstico de base: orientada a conocer las condiciones endógenas (físicas químicas , biológicas y socio-productivas) que condicionan la implementación de una minibiofactoría. (II) Fase 2. Diseño del procedimiento para la implementación de la minibiofactoría: basada en la integración de referentes teóricos, experiencias previas y herramientas participativas con los actores locales. (III) Fase 3. Estimaciones de la viabilidad de la propuesta: proyecciones de autosuficiencia, retorno económico y mejora del suelo a partir de la información generada en las fases anteriores. Este diseño pemitió construir un procedimiento contextualizado, replicable y fundamentado en las condiciones reales de la finca.

Selección del Área de Estudio

La investigación se realizó en la Finca Guayabal entre los años 2021-2025, ubicada en el municipio de San José de las Lajas, provincia Mayabeque, Cuba (22^0 59′ 55” N, 82^0 10′ 02” O). La finca fue seleccionada intencionalmente (muestreo intencional) por su alto nivel de articulación entre actores productivos, docentes e investigadores y de la comunidad, lo que la conviete en un referente para la capacitación local y de réplica del modelo. Esta articulación se manifiesta en la colaboración estable con la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), el Complejo Científico y en su participación en redes de innovacion agroecológica, involucrando los productores.

Fase 1: Caracterización de la finca y diagnóstico de base

Contexto climático del área de estudio

Se resume en la Tabla 1 las condiciones climáticas promedios anuales registradas en el intervalo de tiempo de estudio entre los años 2021 al 2025 para la zona de la finca Guayabal en San José de las Lajas, Mayabeque, por el Instituto de Metereología de Cuba. En la misma se destacan tendencias recopiladas de los datos promedios históricos (2010-2024), referidos para la zona (INSMET-Cuba, 2025).

Estas constituyen variables independientes que influyen en la dinámica del agroecosistema, la generación de biomasa, la producción de residuos orgánicos y los procesos de conservación y transformación propuestos en la finca a través del tiempo.

Variables y parámetros evaluados

A partir del contexto climático descrito, se evaluaron 18 parámetros físico-químicos, biológicos y socio-productivos de la finca, mostrado en la Tabla 2. Las principales variables dependientes incluyeron: (I) contenido de materia orgánica del suelo (%), (II) pH del suelo, (III) disponibilidad de nutrientes (N P K), (IV) generación de residuos orgánicos - kg/mes (variable directamente influenciada por las condiciones climáticas de temperatura y precipitación). (V) manejo del agroecosistema. (VI) composición de los residuos generados. (VII) indicadores socio - productivos (mano de obra, organización, entre otros).

Tabla 1. Datos climáticos medios anuales registrados para la zona de San josé de las Lajas, Mayabeque.

Parámetros anuales	Año 2021 al 2025	Tendencia observada / media histórica de hace 30 años
Precipitación mm	≈533-650	Menos entre el 54-62%
	Pronunciada	Alternancia de años secos y húmedos Estación Seca (Nov-Abr) Estación Luviosa (May-Oct)
Temperatura ^{0}C	24.5-25.5	T.max.+ 1-2.5 ^{0}C
Humedad relativa	70-81%	Menor en la estación seca
Eventos extremos	sequía y ciclones	Aumentadas en frecuencias e intensidad

Muestreo y recolección de datos

Se estableció un diseño de muestreo aleatorio simple en tres lotes principales de la finca Guayabal (área de cultivo intensivo, pastizales y área de reserva). En cada lote se tomaron 10 muestras simples a una profundidad de 0-20 cm, utilizando una barrena. La muestra simple de cada lote se homogenizaron para obtener una muestra compuesta por lote (n = 3 muestras compuestas en total).

El muestreo se realizó en el período de seca (Marzo) para garantizar condiciones estables de humedad. Se georreferenció cada punto de muestreo con GPS.

Recolección de datos de residuos

Se realizó un inventario participativo de residuos orgánicos generados en la finca durante 30 días consecutivos. El jefe de la brigada y dos productores lo registraron diariamente, en plantillas diseñadas para el estudio que contenia: (I) tipo de residuo (estiércol, cosecha, podas y plantas, etc.). (II) cantidad estimada (kg). (III) destino actual (quema, acumulación, alimento animal, etc.).

Seleción de participantes para entrevistas y talleres

Se aplicó un muestreo intencional para seleccionar a los actores claves vinculados a la finca (Kvale, 2011): (I) el criterio de inclusión se fundamentó en el tiempo de trabajo en la finca (más de 2 años). (II) participar en la toma de decisiones productivas, disposición a colaborar. (III) los participantes seleccionados fueron 20 actores claves (consejo dirección de la finca (3), 2 jefes de brigadas, 5 actores permanentes, 10 especialistas de la finca y universidad que acompañan procesos de inivación en la finca.

Técnicas de recolección de la información cualitativa

Dentro de las técnicas de recolección de la información cualitativa se aplicaron con el consentimiento previo de los actores de la finca:

(I) entrevistas semiestructuradas se realizaron con la aplicación de una guía con preguntas abiertas sobre: percepcion de los residuos, conocimientos sobre los bioinsumos, utilidad de los residuos, impacto de su utilización, disposición al cambio, espectativas (Kvale, 2011).

(II) Observación de participantes con la realización de seis visitas de campo (febrero, marzo y abril, 2025) para obsevar directamente los flujos de residuos y necesidades de bioinsumos, mediante registros de audio, fotos y notas de campo, con la georreferenciación respectiva. (III) taller de diagnóstico participativo convocado con el 50% de los actores seleccionados de la finca, se aplicó la técnica de grupo focal (Morgan, 1997), para identificar problemas relacionados con el manejo de residuos y necesidades de insumos, a partir de registros de audio, fotos, notas de campo y georreferenciación. (IV) métodos analíticos de laboratorios de caracterización para suelo, bioinsumos y estudios bromatológicos de los residuos orgánicos, referidos en la Tabla 2 y realizados en los laboratorios de la Facultad de Agronomía de la Universidad Agraria de La Habana UNAH y el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA).

Fase II: Diseño del procedimiento para la implementación de la minibiofactoría

Objeto del diseño

Se trabajó en el diseño de un procedimiento técnico -metodológico teórico para la implementación física y operativa de una minibiofactoría de bioinsumos en la finca Guayabal. Este procedimiento comprende el conjunto de pasos, herramientas y condiciones necesarias para instalar y poner en funcionamiento el sistema (nivel piloto y escalado), adaptado a las condiciones endógenas de la finca.

Fuentes y referentes técnicos para el diseño

Se realizó una revisión bibliográfica de experiencias nacionales e internacionales, donde se consultaron más de 25 publcaciones del período del 2010-2025 en bases de datos como Scopus y SciElO. En los aportes nacionales se integraron: minibiofactoría “El patio” Reyes *et al.* (2022), biofactorías comunitarias integrales Granma (Pérez *et al.*, 2021) y biodigestores de bajo costo en provincias de Mayabeque y La Habana (González y Martinez, 2019; IS-Cuba, 2023). Entre las referencias internacionales sobre implementación de principios de diseño agroecológicos (Altieri y Nicholls, 2012), González y Martinez, 2019) biofactorías, modelos de gestión de residuos (Castro y Fernández, 2023) y cierre de ciclo de nutrientes (Rodríguez *et al.*, 2020). El análisis de estos referentes permitió identificar buenas prácticas, limitaciones y lecciones aprendidas que fueron incorporadas al diseño del procedimiento para adecuarlo a las condiciones endógenas de la finca Guayabal.

Tabla 2. Parámetros y Métodos de caracterización

Parámetro	Metodología de cálculo	Fuente/Base de cálculo
Determinación de datos espaciales de la finca con imágenes satelitales	GPS Sentinel-2 (B4-RED,8-NIR, 10 m res.). Copernicus Open Access Hub QGIS 3.28 Inventario directo y análisis del NDVI	Science for Changing wold USGS, Sentinel Hub, 2024 Fernández (2020)
Procesamiento de imágenes satelitales Sentinel- 2 (15 septiembre del 2021-025), con validación in situ (USGS, 2025)	Cálculos NDVI + zonal Statistics Análisis temporal NDVI NDVI=(NIR-ED)/(NIR+RED) NIR: Banda 8 IR cercano RED: Banda4 (rojo) de Sentinel-2 Aplicación de coeficientes de aprovechamiento Modelos (Estimación de la biomasa (t/ha) con el NDVI.	Costo et al. (2020) Chave et al. (2014) González et al. (2021) INIVIT-Cuba (2023) FAO (2017; 2018; 2021) Dengsheng et al. (2016)
Estimación de la Biomasa Vegetal BV (t/ha.año), mediante el análisis NDVI y aplicando inventario directo	BV=Rendimiento cultivo (t/ha) x área x indice de aprovechamiento cosecha estándares Coef.residuo cultivos 0,3-0,5	González et al. (2021) Taiz (2025) IPCC (2019) Gofc-gold (2023)
Producción de estiércol PE (t/año), usando valores estándar	PE= No. Cabezas x producción media diaria (kg/d) x 365/1000. Coef. 10 kg/d Vacuno; 25-30 kg/d; Menor: 2-4 kg/d	FAO (2018; 2021; 2022) López *et al.* (2020) IPCC (2019)
Balance de nutrientes (NPK),	Déficit (kg)=(rea ha x Extracción media cultivo kg/ha)-(contenido de nutrientes en suelo kg/ha)- aporte bioinsumo, usando coef. de extracción	INCA-Cuba (2020) FAO (2018; 2021)
Autosuficiencia alimentaria (%)	%=(biomasa forrajera producida finca t)/Requerimiento total del ganado t) x 100 Coef. eficiencia compostaje 50%	Funes-Monzote, (2008) FAO (2021; 2022)
Análisis de suelo en muestras compuestas de 0-20 cm de profundidad Potasio Nitrógeno	Análisis del reciclaje de nutrientes (NPK), comparando los nutrientes por cultivo (kg/ha/año), usando tabla de requerimiento Extracción de N cultivos 120kg/ha	FAO (2021) Sánchez (2019) Palm et al. (2001) INCA-Cuba (2023) INCA-Cuba (2020)
Materia Orgánica del Suelo MOS	Oxidación húmeda (Walker-Black,1934) Espectrofotocolorímetro C UV 559 nm	Canellas y Humosfera (2005)
pH	pH Potenciometría metro PHSJ-3F, 1:2,5: suelo; agua	NC:10390, (1999)
Fósforo ppm	UV 900 nm	NC:39 (1999)
Potasio	Fotometría de llama	Paneque (2002)
Nitrógeno	Estimación del N a partit del C orgánico, relación C/N	Paneque (2002)
Requerimiento de bioinsumos (t/ año)	Cálculo / Base de la estimación	FAO (2017) Palm et al. (2001)
Dimencionamiento de la capacidad de procesamiento en el diseño de la minibiofactoría (C)	C= ∑Biomasa aprovechable x eficiencia de proceso Coef. eficiencia: compostaje 50% y Bioles 75%	Funes-Monzote, (2008)
Materia prima para la Minibiofactoría (t/ año)	Cálculo / Base de la estimación	FAO (2017; 2018; 2021)
Diseño con infraestructura existente: Biofábricas,Biodigestor tubular,Canales de silos, Secador solar, Cortador de material natural Prensa hidráulica	Biodigestor tubular: 20 m^3 p/Mezcla estiércol / vegetal:70:30\ Canales de compostajes: 4 unidades de 25x 3,5 m Lombricultivo: 20 camas de 1x5m	Noriega (2024) FAO (2017; 2021) INCA-Cuba (2020) INIA-Cuba (2020) MMA-ONU (2021)
Indicadores de resiliencia, extension, circularidad y perspectivas agropecuarias	Bases metodológicas para la capacitación en la resiliencia y extensión en fincas familiares en Cuba	Casimiro y Casimiro (2018) Casimiro et al. (2020) San Juan y Rodríguez (2016) Tauro et al. (2018) Lascano (2024) Núñez, 2020 OCDE-FAO (2020)
Análisis económico	Inversión inicial; costos, directrices de infraestructura y equipos Costo operativos: mano de obra ,mantenimiento y materiales Beneficios; ahorro por sustitución de insumos + ingresos pre ventas Indicadores: ROI período de recuperación VAN: Metodología Bioeconomía	Altieri y Funes (2012) Báez et al. (2021) Quiroga (2021)

Herramientas participativas para el diseño del procedimiento

Para la construcción colectiva del procedimiento se desarrollaron tres talleres participativos (junio- 0ctubre, 2024) con los mismos actores clave de la Fase I. Las técnicas aplicadas aparecen en tabla 3.

La matriz DAFO permitió identificar estrategias (FO, FA, DO, DA) que fueron traducidas en un plan de acción consensuado con 12 actividades agrupadas en: (I) adecuación de infraestructura. (II) adquisición de tecnológica (III) capacitación. (IV) monitoreo participativo. Este plan constituyó la base del procedimiento final.

Estructuración del procedimiento de implementación

Con la información anterior, se construyó un procedimiento teórico estructurado en cinco fases secuenciales utilizando el enfoque de ciclo Deming (PDCA) adaptado a sistemas agroecológicos: (I) georreferenciación, preparación y adecuación del espacio físico (selección de áreas y acondicionamiento). (II) construcción, adaptación y montaje de tecnología (biodigestores, composteras, áreas de manejo, etc.). (III) puesta en marcha y arranque operativo (primeras cargas, inoculación). A. Nivel piloto. B. Nivel de extensión. (IV) capacitación y transferencia (entrenamiento a los productores). Monitoreo y ajustes iniciales (nivel piloto). Este procedimiento fue presentado y discutido con los actores de la finca en un taller de retroalimentación participativa para su validación social (Geilfus, 2022), donde se sugirieron, consensuaron y realizaron los siguientes ajustes: (I) adecuación del lenguaje técnico a terminos locales y de uso cotidiano en la localidad. (II) modificación en el orden de algunas actividades de acuerdo a la disponibilidad estacional de mano de obra. (IV) incorporación de prácticas tradicionales de manejo de residuos que los actores consideranron importantes para conservar.

Como resultado de este proceso colaborativo, se obtuvo una versión final del procedimiento consensuada y contextualizada a las condiciones de la finca Guayabal, lista para ser implementada en una etapa posterior. Cabe aclarar que este proceso constituyó la validación social y participativa del diseño, más no una empírica, la cual requeriría la implementación y monitoreo del procedimiento en campo en estudios porteriores del proyecto.

Estimaciones de viabilidad de la propuesta

Para evaluar la factibilidad potencial del procedimiento diseñado, se realizaron estimaciones y proyecciones a partir de la información disponible y modelos referenciados en la literatura (Tabla 2):

1. Autosuficiencia en bioinsumos se estimó mediante un balance teórico de la oferta- demanda: (I) oferta proyectada (residuos orgánicos kg/mes por coeficiente de transformación (Rodríguez *et al.*, 2020). (II) demanda: (requerimientos estimados de bioinsumos para los cultivos existentes kg/mes, según dosis técnicas recomendadas por el instituto de suelo (IS-Cuba, 2023). (III) resultado de la estimación (oferta proyectada/ demanda) x 100).
2. Retorno de la inversión (ROI), se proyectó en el tiempo necesario con estimaciones la recuperación de la inversión inicial a partir de: (I) inversión inicial estimada (costo infraestructura, equipos y material (basado en en cotizaciones locales y experiencia de referencias similares). (II) ahorro mensual proyectado: (I) gasto actual de bioinsumos externos que serían sustituidos por la producción propia. (II) tiempo estimado de retorno: inversión inicial/ahorro mensual (Gitman y Zutter, 2012).
3. Proyecto de mejora del suelo: Se modelo el posible incremeto de la materia orgánica (MOS) a partir de: (I) tasa de aplicación estimadas: cantidad de bioinsumo que se producirían anualmente, según la oferta de residuos. (II) curvas de respuestas; modelos de acumulación de MOS referidos en la literatura para suelos similares con enmiendas orgánicas (Ponce, 2006). (III) escenario proyectado en años de incremento de la MOS.

Estas estimaciones no constituyen una validación empírica del procedimento, sino una aproximación teórica que sugiere su viabilidad potencial y orienta futuras etapas de implementación y monitoreo en campo.

Fase III: Procesamiento y análisis de datos

Los datos se procesaron: (I) cuantitativos: Microsoft Excel 2016 para el cálculo estadístico descriptivos (media , desviación estandar) para los parómetros de suelo y residuos. La proyección de mejora de la MOS se modeló mediante regresión lineal simple basada en tasas de

Tabla 3. Técnicas aplicadas en los talleres participativos

Talleres	Técnica	Propósito	Referencia
Taller 1	Matriz DAFO participativa	Identificar fortalezas, oportinidades, debilidades, amenazas para la implementación	(Geilfus, 2022)
Taller 1	Árbol de problemas	Analizar causas y efectos de la problemática de residuos	GTZ (1998)
Taller 2	Mapeo de actores	Definir roles y responsabilidades en la futura implementacion	Tapella (2007)
Taller 2	Matriz de priorización	Seleccionar las tecnologías más adecuadas (tipo de biodigestor, composteras , etc.)	Elaboración propia basado en criterios de actores
Taller 3	Consesurar el plan de acción	Derivar de la matriz DAFO y el árbol de problemas las acciones concretas para implimentar la minibiofactorías y validación social.	Adaptado de Geilfus (2022)

aplicación, según evaluacion del estado del suelo. (II) cualitativos: las entrevistas, talleres fueron transcriptos y analizados mediante análisis de contenido temático (Braun y Clarke, 2006), con apoyo del Atlas. Ti 8, indicando categorías emergentes sobre percepciones, conocimientos y viabilidad social del modelo.

Considerciones éticas

Se obtuvo consentimiento informado de todos los participantes. Se garantizó la confidencialidad de los datos personales y la devolución de resultados a la comunidad mediante un taller de socialización.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la finca y diagnóstico de base (Fase I)

La finca Guayabal se localiza en Carretera de Tapaste, San José de las Lajas Mayabeque, Cuba. Las coordenadas geográficas 22^0 59′ 55” N, 82^0 10′ 02” O (COD Ubic: IPEN 76JXVXRXJ + P3), fueron georreferenciadas para ubicar los puntos de muestreo dentro de la finca y facilitar la réplica del estudio metodológico en fincas con condiciones análoga, lo que origina oportunidades para la articulación y capacitación con los productores locales (Geilfus, 2022).

Cuenta con un área total de 846,6 ha, mayor que 29 ha para fincas representativa que ocupan el 9% dentro de la provincia, según estudios realizados por Fundora *et al.* (2024). Las áreas se encuentran distribuídas en: pastos que ocupan 770,4 ha (asociado a vaquerías), cuerpos de agua (Lagunas) en 76,2 ha, superficie en barbecho de 25,5 ha y áreas agrícola en 100,6 ha.

La caracterización productiva y agroecológica se encuentra: (I) producción agrícola en 387,2 ha (en rotación / sucesión). (II) cultivos anuales en sucesión: frijol-maíz-maní- ajo- boniato-tomate-calabaza-pepino- malanga. **(**III) cultivos perennes (monocultivo): plátanos, yuca, coco. (IV) frutales (diversidad específicas): caimito, guayaba, maracuyá, mango, aguacate, mamoncillo, guanabana, fruta bomba, limón. (V) Pastos: de calidad en 43 ha, con baja calidad en 25,8 ha y maleza natural 87,8 ha como reserva de biodiversidad. (VI) barbecho agrícola con 89,7 ha. (VII) para la producción Ganadera y de Forrajes: Pastos (266,6 ha), forrajes cultivados como King Grass (25,8 ha), caña de azúcar (2,8 ha), mezcla de titonia, moringa y King Grass (12.5 ha). (VII) La caracterización pecuaria esta dada en una dinámica poblacional del ganado (No. Cabezas/año) para ganado mayor (vacuno): 2021-353, 2022- 336, 20, 2023-320, 2024-296, 2025-482 y ganado menor (ovinos, caprinos, cerdos, conejos,aves) entre ≈ 313 (2021-2025) en el 2025,indicando capacidad.

Los datos climáticos (2010-2025) obtenidos de la zona (Tabla 1), muestran valores medios de precipitación de 1350 mm y temperaturas de 24.5 ^{0}C, condiciones que determinan la productividad primaria, la generación y conservación de residuos y la posible fluctuación en la población ganadera (González *et al.*, 2021).

Dentro de los parámetros evaluados para el suelo que forma la granja Ferralítico Rojo Lixiviado en los estudios realizados se destaca el contenido de materias orgánica de un 1.55% el cual es bajo para estos suelos de composición Ferralítica. El pH se encontró entre 7,2- 7,6 (ligeramente alcalino) tendencia que caracteriza a estos tipos de suelos. La relación de nutrientes se encontró a un nivel bajo: potasio K de 0,35 cmol/kg (nivel bajo), fósforo P: 0,95 ppm (nivel muy bajo), nitrógeno N: 0,10%, (nivel bajo) y la relación C/N en 11, 98 que se encuentra dentro de un rango aceptable para la mineralización. Estos resultados muestran a estos suelos con características de ser clasificados como Agrogénicos, degradados por su manejo no adecuado durante su explotación (Hernández *et al.*, 2014).

En la infraestructura física disponible y subutilizada en la finca se destaca: almacenes con áreas en desuso de mampostería, con y sin techos, piso de cemento y estructuras de prefabricados subutilizadas: áreas de ensilajes sin uso con potencial de reconvención y cercas perimetrales. Infraestructura de regadío y tomas de agua operativas. Existencia de prototipos artesanales disponibles como secador solar, prensas, molinos. biodigestor, triturador, horno pirolíticos, máquina cortadora de importancia para el procesamiento de la biomasa. Estos elementos constituyen una base potencial favorable para el reciclaje de nutrientes y su transformación más económica (Altieri y Nicholls, 2012; Rodríguez *et al.*, 2020).

El análisis geoespacial multianual de la cartografía para estimar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) generadas a partir de imágenes Sentinel-2 se muestra en la Figura 1. Este permitió la identificación espacial explícita de las zonas con mayor potencial de biomasa.

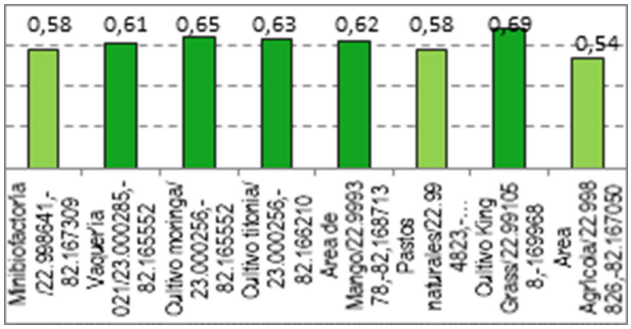


Figura 1. Valores promedios del análisis multianual de la cartografía NDVI generadas a partir de imágenes Sentinel-2 (2021-2025).

El NDVI revela la capacidad fotosintética estable de la finca, con valores promedios de 0.57-0,69 según las zonas. El King- Grass (NDVI: 0,69), la moringa y titonia (NDVI: 0,65) presentaron la mayor biomasa potencial, mientras las áreas agrícolas la menor (NDVI: 0,54), según lo referido por López *et al.* (2020). La correspondencia directa entre los valores de NDVI (> 0,65) y la coloración verde intensa en los mapas, indican visualmente la ubicación de los cultivos claves para la Minibiofactoría como el King Graas, moringa y titonia, confirmando su vigor y salud vegetal. Por el contrario, las áreas con tonalidades amarillenta (NDVI ≈ 0,54), coincidieron con las zonas agrícolas de menor cobertura, reforzando la necesidad de intervención con bioinsumos.

Esta consistencia interanual reflejada a través de los años sugiere la capacidad de sostenibilidad productiva de biomasa para aportar sistemáticamente materia prima para la producción en la Minibiofactoría; fundamentalmente en cultivos de amplio valor nutritivo que son utilizados con fines alimentarios de los animales, cuyos restos de este proceso y podas pueden ser aprovechados como material altamente nutritivo para la elaboración de bioinsumos agrícola.

La estimación del potencial de biomasa endógena calculada a partir del NDVI ponderado se refleja en la Tabla 4, muestra que la finca genera un excedente anual de 2 900 t de biomasa (vegetal + estiércol). La Minibiofábrica piloto solo requiere 400 t (13,8%), señalando una alta resiliencia ante variaciones en la disponibilidad y un potencial sólido de materia prima. Al analizar la demanda de bioinsumos comparado con la capacidad de producción, la primera (200 t/año), es inferior a la capacidad de producción potencial con la materia prima asignada (400 t/ año); esto sugiere que desde un inicio se puede producir excedentes para la venta o el escalamiento del proceso.

El balance nutricional negativo crítico como el déficit de nitrógeno (- 1 205 kg) es más alarmante y justifica técnicamente la necesidad de priorizar la producción endógena de biofertilizantes nitrogenados (compost enriquecido con bioles). En la autosuficiencia alimentaria en transición, el 65% forrajera corrobora la estrategia exitosa de reducir la dependencia externa.

La Tabla 5 resume de manera concluyente que la finca Guayabal no solo tiene potencial endógeno para implementar la minibiofactoría, sino que ésta se presenta como una solución necesaria y técnicamente cuantificable para cerrar sus ciclos de nutrientes y alcanzar una mayor sostenibilidad productiva, sirviendo como modelo replicable para el territorio. El potencial endógeno de la finca Guayabal demuestra una relación óptima entre los recursos disponibles y las necesidades internas de la misma. Lo que llevaría hacia una transición exitosa de la alimentación animal y bioinsumos agrícolas con recursos propios.

Análisis participativo para generar plan de acción para el diseño del modelo ha proponer para la impletación de la minibiofactoria

Matriz DAFO participativa

En los talleres iniciales con los actores claves se recopiló información y se identificaron fundamentalmente con el análisis de la matriz DAFO:

Tabla 4. Estimación del potencial de biomasa endógena y cálculo - estimación base.

Parámetros	Valor	Cálculo / Base de la estimación en Área total (846,6 ha)
NDVI ponderado (Biomasa Vegetal)	0,65	Estimado a partir de la cobertura mixta (cultivos activos, pastos, frutales, perennes, maleza). Valores > 0.6 indican vegetación vigorosa.
Biomasa Vegetal total (t/ año)	922	(100,6 ha agrícola x 5 t/ha) + (2666,6 ha pastos/forrajes x 2,5 t/ha) + 87,8 ha maleza x 1,5 t/ha). Incluye residuos de cosechas, podas, excedentes de forrajes)
Estiércol Animal total (t/ año)	1978	(482 cab. De ganado vacuno x 10 t/ año) + (313 Cab. Ganado menor x 2 t/ año). Basado en producciones medias por cabezas.
Requerimiento de bioinsumos (t/ año) FAO (2017**b**)	200	Calculado para abastecer el 100% del área agrícola (100,6 ha), con una aplicación media de 2 t/ha/ año). FAO (2017)
Materia prima / Minibiofactoría (t/año)	400	Uso de 200 t de biomasa vegetal + 200 t de estiércol. Representa solo el 21,7% de la biomasa vegetal y el 10,1% del estiércol disponible.
Autosuficiencia alimentación animal (%)	≈ 65	Basado en la transición 2024-25. Uso intensivo de 25,8 ha de King Grass (70t/ha/ año) + 5,4 ha de titonia/moringa + pastos naturales.
Balance NPK - Déficit (kg/ año)	N: -1205 P_2O_5: -400 K_2O: -1150	Cálculo basado en extracción media de cultivos (N; 120, P_2O_5: 50, K_2O: 115) en 100.6 ha, vs contenido de nutrientes en el suelo (N; 10%, P_2O_5: 0.95 ppm, K_2O: 0,35 cmol/kg)

Tabla 5. Resumen del potencial endógeno para la Minibiofactoría

Parámetros	Valor	Potencial p/ minibiofactoría
Área total	846,6 ha	Escala adecuada para modelo demostrativo
Biomasa Vegetal	992 t/año	Materia prima para compost y Bioles
Estiércol Animal	1978 t/año	Fuente de N y microorganismos
Suelos (MO)	1,5%	Demanda interna asegurada de bioinsumos
Infraestructura disponible	400 m^3	Reduce inversión inicial en un 65%

I. Fortalezas (F): F1. Finca por función docente - investigativa. F2. Disponibilidad de residuos con amplia diversidad de materias primas vegetales y animales en un área de 846,6 ha. F3. Mano de obra capacitada con voluntad de cambio. F4. Potencialidades para área de producción y almacenamiento de la minibiofactoría con la infraestructura en desuso y regadíos. F5. Prototipos artesanales para el procesamiento de la biomasa. F6. Soporte técnico apoyado por la dirección de economía de la finca con especialistas y digitalización, cuenta con suministro eléctrico en todas las áreas.

II. Debilidades: D1.Alimentación animal se caracterizó por un período 2021 -23 donde existió una alta dependencia de insumos externos con gastos elevados en piensos concentrado (≈ 2,755,255.75 - 2,849, 246.54 pesos cubanos anuales) y un período 2024 -25 con tendencia hacia una transición hacia sistemas más autosuficientes. D2. Necesidad de la aplicación de bioensumos para los suelos agrogénicos. D3. Dispersión especial de los residuos. D4. Falta de infraestructura de acopio y áreas potenciales para su procesamiento.

III. Oportunidades: O1. Autónoma en la finca posibilita que la autosuficiencia del proceso. O2. Apoyo institucional del complejo científico. O3. Políticas locales.

IV. Amenazas: A1. Variabilidad climática, A2. Posible resistencia al cambio de métodos tradicionales. A3. Infraestructura requiere adecuación para el nuevo uso y tener limitaciones de recursos financieros para inversión inicial.

Cruces estratégico de Matriz DAFO y acciones derivadas

A partir de este análisis, se realizó un cruce DAFO con todas las variables que permitió derivar acciones estratégicas claves (Núñez *et al.*, 2020), para implementar el diseño del plan donde prevalezca un marco para la adaptación en otros contextos (replicabilidad).

Se derivó un plan de acción estratégico dirigidos a cinco fases cruciales:

1. FO (F1 + F2+ O2): Diseño de red de nodos logísticos con apoyo institucional.
2. FA (F1 + F3 + A1): Programa de capacitación participativa para adaptar el manejo a la variabilidad clim'atica.
3. FD (F4 + D2): Implimentación de minibiofactoria para transformar residuos.
4. DO (D3 + F3): Establecimiento de rutas optimizadas usando mano de obra local.
5. DA(D3 + D4 + A2): Implementación escalonada de bajo costo (comenzar por nodos pilotos y extender progresivamente, si el monitoreo es factible).

Procedimiento diseñado para la implementación de la minibiofactoria y red logística (Fase II)

A partir del análisis anterior, se estructuró un procedimiento en cinco fases basado en el ciclo PDCA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar), adaptado a sistemas agroecológicos por Velandia y Restrepo (2018): (I) preparaci'on del espacio. (II) construcción y montaje de tecnologías. (III) puesta en marcha (IV) capacitación. (V) monitoreo. Este procedimiento fue presentado y discutido con los productores en talleres participativos con ajustes colaborativo, alcanzando una versión se consensuada de acuerdo con los principios de la metodología participativa de Geilfus (2022).

Dimensionamiento de la Minibiofábrica

Basado en la materia prima disponible (992 t/año de residuos de cultivos, malezas, forrajes, excedentes y 989 t/ año, donde el 50% es de 1978 t/ año de ganado mayor y menor), y considerando un enfoque de bajo costo, se realiza el dimensionamiento de la Minibiofábrica en fase piloto con las estructuras de los almacenes en desuso. La capacidad estimada entre 1-2 años es para procesar 200 t/año de bioinsumos, lo cual puede cubrir el 100% de las necesidades agrícolas endógenas de la finca más los excedentes para venta inicial. La capacidad estimada entre 3-5 años, sería para procesar 500t/ año de bioinsumos, en fase de extensión con estructuras de silos, se estima que puede llegar abastecer el territorio. Estas fases quedan resumidas en la Tabla 6.

La estimación de las capacidades de producción estimadas comparada con la demanda interna para la finca, lo cual fundamenta la autosuficiencia de la misma (Tabla 7).

La autosuficiencia estimada del 162% global excede el umbral del 100% recomendado por Altieri *et al.* (2015), para considerar viable un modelo de instauración de biofábricas. Los excedentes representados en la Tabla 7, sugieren una oportunidad de ingresos que pudiera acelerar el retorno de la inversión, indicando la viabilidad económica del modelo. El estimado del análisis de costo por inversión para las fases piloto y de extensión (Tabla 8). En ella se aprecia que, aunque la inversión inicial y el costo operativo son superiores en $ 2750 y $ 2500 en la fase de extensión, observamos como el beneficio neto anual se incrementa en un periodo de recuperación menor en un mes.

El porcentaje de retorno de la inversión (ROI) del 315% y 345% supera ampliamente el 15-20% considerado aceptable para proyectos agropecuarios (López *et al.*, 2020). El valor del retorno de inversión (ROI), muestra que a pesar que la fase expansión, aunque tenga involucrado más de inversión inicial que la piloto, la eficiencia y rentabilidad de la inversión con relación al costo es adecuada. La rápida recuperación estimada entre 15-16 meses se explica por el aprovechamiento de infraestructura existente y la reducción inmediata en compra de insumos. El diseño en canaletas de silos representa una innovación en costo - efectividad.

Tabla 6. Dimensionamiento de la fase piloto y de expansión

	FASE PILOTO				FASE EXPANSIÓN			
Componente	**Dimensión**	**Área m²**	**Capacidad**	**Ubicación Relativa**	**Dimensión**	**Área m²**	**Capacidad**	**Ubicación Relativa**
Pre-compostaje	10 m x 10 m	100	50 t batch	Exterior contiguo a vaquerías	20m x 15m	300	50 t batch	Piso cementado sistema drenaje
Compostaje Principal	15 m x 10 m	150	100 t/año	Patio central e/ almacenes	25m x 15m	375	300 t/año	Turnos superpuestos, volteo mecánico
Lombricultivo	5 m x 10 m	50	20 t/año. humus	Zona sombreada norte	10m x 15m	150	50 t/año. humus	Sistema de riego x goteo automático
Procesamiento Biopreparados	8 m x 6 m	48	30 t/año	Almacén techado 1	12m x 10m	120	80 t/año	Mesa embotelladora área calidad
Almacén/ Embalaje	6 m x 6 m	36	---	Almacén techado 2	10m x 8m	80	----	Estantes, zona de carga y descarga
Zona Fermentación	4 m x 4 m	16	10 t/año	Almacén Semi-techado	8m x 6m	48	20 t/año	Tanques fermentación sellados

Tabla 7. Capacidades de producción vs demanda interna de la finca

Bioinsumos	**Producción**	**Demanda Finca**	**Autosuficiencia**	**Excedente**
Compost (t/año)	300	200	150%	100
Bioles (L/año)	150 000	100 000	150%	50 000
Humus (t/año)	100	50	200%	50
MEM	10 000	5 000	200%	5 000
Biocarbón (t/año)	9	8,2	100%	0,8

Tabla 8. Análisis de inversión y retorno

Parámetros	**Fase Piloto**	**Fase Expansión**
Inversión inicial USD	$4 000	$ 6 750
Costos operativos anuales USD	$5 800	$8 300
Beneficio Neto anual USD	$14 200	$23 300
ROI %	315	345
Periodo de recuperación (meses)	16	15

Cierre de ciclo de nutrientes

La eficiencia en el cierre exitoso de nutrientes con la introducción de las minibiofactorías de procesamientos de residuos en bioinsumos se aprecia en la Tabla 9. Se estimó la autosuficiencia nutricional de producir más de lo que se necesita en la finca (162%). La reducción de pérdidas de un 40% a menos de un 10% de manera general refleja la eficiencia del 85% en N y K que supera el 30-40% de los sistemas convencionales referidos por Havlin *et al.* (1999). Se estima la mejora en eficiencia general de uso de un 30% a un 40%.

El cierre del flujo de nutrientes cíclicos representa una transición de una agricultura extractiva a una generativa en la finca, donde la fertilidad es gestionada y reciclada internamente, lo que deriva en una sostenibilidad en la misma.

Red de Nodos Logísticos (RNL)

La optimización de rutas para la recolección y pre procesamiento de biomasa con un sistema de recolección y pre procesamiento eficiente puede minimizar los costos por transporte, siendo esta una de las debilidades existente en la finca y determinadas dentro del plan de acción estratégico.

Tabla 9. Eficiencia en el cierre de ciclo de nutrientes

Nutrientes	Extracción anual	Recuperación Minibiofactoría	Eficiencia Cierre/ medio
Nitrógeno(N)	1 459 kg	1 232 kg	85-90 %(en compostaje + biodigestor)
Fósforo (P)	580 kg	420 kg	70-75% (menos pérdidas por lixiviación)
Potasio (K)	1 380 kg	1 173 kg	80-85% (en bioles y compost)
Materia Orgánica -MO	3 200 kg (estimado por pérdidas suelos)	2880 kg	90-95% (en sustratos con compost + biocarbón)

Tabla 10. Red de nodos Logísticos y puntos de generación de residuos

Nodo	Coordenadas	Función	Puntos de generación abastecidos	Residuo Principal
Sur (S)	22 992500-82 170200	Fase 3. Transporte al área de central. Acopio y preprocesamiento para envío a minibiofactoría central.	Vaquerías del sur, áreas de cultivo del sur	Estiércol vacuno,restos de cosecha, malezas
Centro (C)	22 988800-82 167000	Fase 1. Minibiofactoría central piloto (1.5 ha: 3 módulos) Procesamieto inicial de residuos para producción de bioensumos.	Zonas cercanas a la biofactoría central piloto.	Estiércol vacuno,residuos de cosechas cercanos.
Norte (N)	23 001000-82 164900	Fase 2. Minibiofactoría extensión (2 ha: 4 módulos) Procesamieto adicional de residuos para abastecer zonas más alejadas.	Vaquerías del norte, áreas de cultivo del norte	Estiércol vacuno, titonia, moringa, rastrojos
Híbrido	Ubicación estratégica según flujo	Fase 4. Nodo híbrido que combina mnibiofactoría + ruta optimizada). Procesa 1325 kg/d mediante flujo Norte y Sur	Flujo Norte y Sur desde múltiples áreas.	Biomasa vegetal dispersa (poda, rastrojos, titonia , moringa)

Es posible viabilizar el proceso preservando la calidad de la biomasa y minimizando el volumen de material transportado, con el establecimiento de nodos o bloques intermedios entre el origen de la biomasa y de procesamiento con áreas de preparación inicial de la biomasa vegetal de corte, secado, empaque, pre compostaje y transformación a Biocarbón en hornos pirolíticos artesanales. Éstas se sugieren ubicarlas en estructura de ensilajes (silos) a 720 m de la Minifactoría. Esto además de preservar la calidad de la biomasa, reduce también el transporte directo del estiércol desde las vaquerías (distancia entre 240-840 m a los silos) y realizar un pre compostaje al mezclar con biomasa de restos de podas de moringa/titonia que se encuentra adyacente a solo 400 m.

EL establecimiento de rutas viables estimadas para reducir el volumen de material transportado se encontró entre un 30-50%.

Se sugieren: (I) Ruta1. Vaquerías - silos (pre compostaje) - Minibiofactoría. (II) Ruta 2. Áreas de pastos y cultivos - puntos de acopio intermedios - Minibiofactoría. (III) Un acopio intermedio en el terreno agrícola a 750 m de la minibiofactoría para biomasa vegetal, donde la distancia promedio de transporte sería de 500 - 1000 m biomasa vegetal y de 700 - 1500 m para el estiércol, según las rutas optimizadas.

La adecuación de la ubicación de las tecnologías artesanales (biodigestor, secador solar, triturador, cortador, hornos pirolíticos), están relacionadas con el proceso existente de acuerdo a las rutas más viables sugeridas y la ubicación de minifactoría de pre compostajes intermedias.

Se diseñaron cuatro grupos según su ubicación (minifactoría de pre procesamiento, rutas optimizadas para transportar la biomasa hacia ellas), conformándolos por bloques o nodos: (I) minibiofactoría (Fase 1: Centro y 2: Norte). (II) rutas optimizadas (Fase 3: Ruta optimizada central). (III) híbrido (Fase 4: contienen la minifactoría y rutas optimizadas). El diseño y caracterización se detallada de cada bloque o nodo (Sur, Centro, Norte e híbrido) en la Tabla 10.

En la misma se puede apreciar dentro del diseño propuesto subdivisiones en módulos por cada bloque o nodo que garantizaría la viabilidad del trabajo en ellas. Para el caso del nodo hídrido se ubica estratégicamente según los flujos de biomasa.

La ruta optimizada recolecta los residuos desde nodos en un solo recorrido semanal (figura 2).

Con esta red se estimó una reducción del 67% en viajes (de 15 a 5), del 60% en combustible (de 120 L a 48 L/ semana) y del 60% en tiempo de trabajo (de 25 a 10h/semana). El procedimiento en los nodos mejora la homogeniedad y reduce la putrefacción, o sea calidad y volumen de biomasa a transportar lo que incrementa la eficiencia de la producción de bioinsumos. Este enfoque logístico no ha sido generalizado en experiencia cubanas previas (González y Martinez, 2019; Pérez *et al.*, 2021), donde las biofactorías se estudian como unidades aisladas.

En la tabla 11 se aprecia la rentabilidad comparativa estimada para cada estrategia, la híbrida que combina los bloques de las minbiofactorías y las rutas es la más eficiente, aportando una máxima: producción de 99 t/año vs 27 t/año proyectado, economía de $ 290 USD vs $ 630-1360, el retorno sobre la inversión ROI es de 1,35 % con recuperación en 3días, lo que sugiere la viabilidad de la propuesta. Se destaca la mayor resiliencia en los 3 sistemas independientes, la estructuración en bloques permite ante la ocurrencia de fallos en cualquiera de ellos y escenarios de contingencia (lluvias extremas, falla de energía, escaséz de personal), que los otros continuen operando, lo que ilustra la adaptabilidad y flexibilidad del modelo que se propone.

Estimaciones de viabilidad de la implementación de la minibiofactoría en la finca Guayabal

A partir de la biomasa endógena estimada (10,2 t/año) y de modelos referenciados, se proyectó: (I) autosuficiencia en bioinsumos de un 162% (oferta/demanda), superior al 120% referido por González y Martinez (2019), debido a la mayor generación de residuos en el Guayabal. (II) retorno de inversión (ROI) de 16 meses dentro del rango encontrado por Pérez *et al.* (2021) a los 14-18 meses en la provincia de Granma, Cuba. (III) se estimó mejora de la materia orgánica del suelo de 1.55% a 4% en tres años, consistente con modelos de acumulación de MOS (Ponce, 2006) y con los principios de la agroecología (Altieri y Nicholls, 2012; Altieri et al., 2015). (IV) la autosuficiencia en la alimentación animal se estima su mejora en un 31%, esto concuerda con los referido por Funes-Monzote (2008) para sistemas agroecológicos cubanos en fincas locales. (V) reducción de la dependencia externa proyectada que se puede reducir en un 81%, lo que genera una resiliencia ante las fluctuaciones del mercado.

El balance económico (USD/año), planea un perfeccionamiento progresivo siete veces mayor al porcentaje del valor inicial, lo que se corresponde con lo referido por SAFE (2002), para sistemas productivos de fincas o granjas.

Alcance y valor del estudio

El principal logra del estudio es haber obtenido por primera vez, en el contexto de la finca Guayabal con su carácter docente educativo y su alta articulación institucional, un procedimiento metodológico original, participativo y contextualizado para la implementación de una minibiofactoría de bioinsumos que integra una red logística georreferenciada (Figura 2).

La Figura 2 muestra el esquema que representa la distribución espacial de los cuatro nodos intermedios que conforman la red logística. El nodo centro (fase 1) que opera como minibiofactoría piloto con 1,5 ha y 3 módulos internos de trabajo. El nodo Norte (fase 2) que opera como minibiofactoría extensión (Estructuras de Silos), con 2 ha y 4 módulos internos de trabajo. El nodo Sur (fase 3) que se dedica al acopio y transporte de residuos más lejanos hacia el área central. El nodo Híbrido (fase 4) combina procesamiento en minibiofactorías y ruta optimizada, con capacidad de producción estimada de 1325 kg/d. Las flechas continúas carmelita (estiércol) y discontinuas verde (biomasa), o sea indican flujo de residuos desde la fuente (vaquerías, áreas de cultivo y aristas) hacia cada nodo. La ruta optimizada principal (líneas discontinuas más gruesas y azul) conecta con los nodos en un circuito (sur-centro-norte-hídrico) reduciendo viajes, combustible y tiempo en un 60-67%. Una flecha alternativa (discontinua más clara), permite opcionalmente cerrar el circuito desde nodo hibrido hacia el Sur, de acuerdo a la cantidad de biomasa existente. Finalmente, las flechas punteadas verdes representan el retorno de bioinsumos (compost, bioles, biocarbón, extractos) desde los nodos de procesamiento hacia zonas productoras, cerrando el ciclo de nutrientes.

Este modelo cíclico se correponde con las buenas prácticas de la economia circular referidos por Villalpanda (2024) y se proyecta en tres fases fundamentales de implementación:

Tabla 11. Rentabilidad comparativa estimadas para cada estrategia

RENTABILIDAD COMPARATIVA			
Inversión	$ 1 360 USD	$ 860 USD	$ 290 USD
Ahorro	+ recursos existentes + $ 1070 vs Minibiofactorias	+ $ 340 vs Rutas	$ 1070 vs Rutas $ 340 vs Minibiofactorias
Costos anuales	1 300	1 620	2 660
Beneficio Neto (USD/año)	13 900	13 580	43 825
ROI anual (%)	1,022	1,579	1,350
Recuperación (meses)	1,2	0,8	0,08

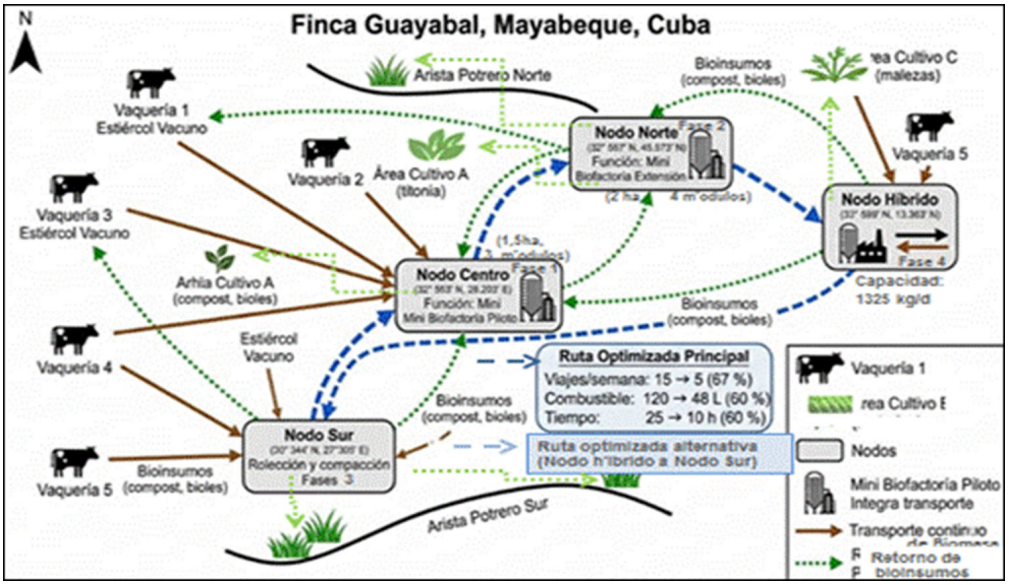


Figura 2. Esquema general de la red logística para la implementación de la minibiofactoría en la finca Guayabal.

FASE 1, (0-6 meses), implementación piloto, como minifactoría básica. Establecer área de pre-compostaje en estructuras de ensilajes a 720 m de distancia como extensión. Implementar rutas optimizadas de recolección y estableciendo nodos intermedios, usando análisis geoespacial.

FASE 2, (6-18 meses), escalamiento operativo, desarrollar bioinsumos específicos para los suelos presentes de acuerdo a sus condiciones. Establecer programas de capacitación para productores endógenos y locales, según nivel educativo. Implementar sistema de monitoreo y control de calidad sistémica.

FASE 3, (18-36 meses), consolidación de la implementación. Convertir la finca en centro de referencia Nacional. Desarrollar modelo de réplica para diferentes escalas productivas. Establecer red de comercilización de bioinsumos en el territorio (González, 2023).

El modelo propuesto constituye una herramienta no generalizada hasta el momento, construida sobre la base de las condiciones endógena de la finca, pero concebida con un enfoque adaptable y replicable a otras fincas locales que compartan principios agroecológicos y necesidades de cierre de ciclos de nutrientes. Al tratarse de un estudio de alcance propositivo, las estimaciones de viabilidad presentadas son proyecciones teóricas fundamentadas, que deberán ser validadas empíricamente en etapas posteriores. Lejos de ser una limitación, esta condición define el carácter pionero del trabajo y sienta las bases metodológicas para futuras implementaciones en el territorio.

CONCLUSIONES

- La finca Guayabal reúne condiciones técnicas, económicas y sociales para implementar exitosamente una minibiofactoría de bioinsumos agrícolas. El diseño propuesto garantiza autosuficiencia del 162% con retorno de inversión en 16 meses, demostrando alta rentabilidad.
- El cierre de ciclo de nutrientes alcanza eficiencias del 85% para nitrógeno y potasio, superando sistemas convencionales. La estrategia de réplica escalonada se estima que permita impactar aproximadamente 45 productores en 3 años, multiplicando el efecto demostrativo.
- El modelo constituye una alternativa viable para la soberanía alimentaria y la sostenibilidad agrícola en condiciones locales. Para futuras investigaciones, se recomienda: (I) estandarizar los protocolos de calidad para bioinsumos agrícolas obtenidos. (II) desarrollo de mercados locales de carbono por captura de suelo. (III) realizar estudios de ciclos de vida comparativos con insumos químicos comerciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTIERI, M.A.: "Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables", *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*, 34, 2002.

ALTIERI, M.A.; FUNES, M.F.R.: "The paradox of Cuban agriculture", *Monthly Review*, 63(8): 23-33, 2012.

ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I.: *Agroecología: única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica*, Ed. SOCLA, 2012, ISBN: 978-958-44-6978-6.

ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I.; HENAO, A.; LANA, M.A.: "Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems: MA Altieri et al.", *Agronomy for sustainable development*, 35(3): 869-890, 2015, ISSN: 1774-0746.

ARTEAGA, M.; PINO, J.A.: "Proposal for a model for the implementation of circular biofactories for agricultural

goods on Cuban farms", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 34: cu-id, 2025, ISSN: 2071-0054.

BÁEZ, N.; LOK, S.; GÓMEZ, C.: "Determination of the environmental economic value of a tropical typical dairy farm of Mayabeque, Cuba", *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2), 2021.

BRAUN, V.; CLARKE, V.: "Using thematic analysis in psychology", *Qualitative research in psychology*, 3(2): 77-101, 2006, ISSN: 1478-0887, DOI: https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a.

CANELLAS, L.S.; HUMOSFERA, G.: "tratado preliminar sobre a química das sustancias húmicas", 2005.

CASIMIRO, L.; CASIMIRO, J.A.: "How to make prosperous and sustainable family farming in Cuba a reality", *Element: Science of the Anthropocene*, 6, 2018.

CASIMIRO, L.; CASIMIRO-GONZÁLEZ, J.A.; SUÁREZ-HERNÁNDEZ, J.; MARTÍN-MARTÍN, G.J.; NAVARRO-BOULANDIER, M.; RODRÍGUEZ-DELGADO, I.: "Evaluación de la resiliencia socioecológica en escenarios de agricultura familiar en cinco provincias de Cuba", *Pastos y Forrajes*, 43(4): 304-314, 2020, ISSN: 0864-0394.

CASTRO, J.; FERNÁNDEZ, E.: *Modelo de gestión circular de residuos orgánicos en fincas de Mayabeque*, Inst. Ministerio de la agricultura, Instituto de Suelos, informe técnico, La Habana, Cuba, 2023.

CHAVE, J.; RÉJOU, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P.M.; GOODMAN, R.C.: "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees", *Global change biology*, 20(10): 3177-3190, 2014, ISSN: 1354-1013.

COSTO, L.; NUNEZ, L.; AMPATZIDIS, Y.: "Un nuevo índice de banda visible para estimar valores de NDVI. Computadoras y electrónica en la agricultura 172", *ScienceDirec*, 2020, DOI: https://doi.org/10.1016/compag.2020.105334.

DENGSHENG, L.; LU, M.; CHEN, L.: "Un estudio sobre métodos de estimación de biomasa en área basados en teledetecciones en ecosistemas forestales", *Revista Internacional de la Tierra*, 9(1): 63-105, 2016, DOI: https://doi.org/10,1080/17538947-2014.990526.

FAO: *Evaluación de la sostenibilidad en sistemas agropecuarios. Enfoque y metodología*, *[en línea]*, Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia, 2017, *Disponible en:* https://www.fao.org.

FAO: *Feed inventory and feed balance*, *[en línea]*, Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), FAO. Animal Feed Resources, Roma, Italia, 2018, *Disponible en:* https://openknowledge.fao.org.

FAO: *Balance de nutrientes en la Agricultura*, *[en línea]*, Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Manual de alimentación animal para pequeños productores., Roma, Italia, 2021, *Disponible en:* https://openknowledge.fao.org.

FAO: *Guía de alimentación de animales para climas tropicales*, *[en línea]*, Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia, 2022, *Disponible en:* https://openknowledge.fao.org.

FERNÁNDEZ, D.: *Monitoreo satelital de la resiliencia agrícola en Cuba*, *[en línea]*, Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, Tesis Doctoral, San José de las Lajas Mayabeque, Cuba, 2020, *Disponible en:* http://tesisrepo.sld.cu/123456789/3456.

FUNDORA, L.R.; MARTÍN, G.M.; MIRANDA, I.; RIVERA, R.A.; DUQUE, Y.R.: "Caracterización agroproductiva de fincas de la provincia Mayabeque, Cuba", *Pastos y Forrajes*, 47, 2024, ISSN: 0864-0394.

FUNES-MONZOTE, F.R.: *Farming like were here to stay: The mixed farming alternative for Cuba*, Ed. Wageningen University and Research, 2008, ISBN: 979-8-5160-3873-0.

GEILFUS, F.: *80 herramientas para el desarrollo participativo: diagnóstico, planificación, monitoreo, evaluación*, Ed. IICA, San José. Costa Rica, 2022, ISBN: 978-92-9039-428-5.

GITMAN, L.J.; ZUTTER, C.J.: *Principios de administración financiera*, Ed. Pearson Educación de México, SA de CV, 12 ed ed., México, 2012, ISBN: 978-607-32-0917-9.

GLIESSMAN, S.: "Defining agroecology", *Agroecology and sustainable food systems*, 42(6): 599-600, 2018, ISSN: 2168-3565.

GOFC-GOLD: "Validation protocols", *[en línea]*, En: *Sourcebook for biomass Estimation*, vol. Cap. 4, 2023, *Disponible en:* Gofcgold.wixsite.com.

GONZÁLEZ, D.: *Bioinsumos a pequeña escala en Cuba*, Inst. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, San Jose de las Lajas Mayabeque, Cuba, 2023.

GONZÁLEZ, L.; PÉREZ, M.; RODRIGUEZ, J.A.: "Evaluación del estrés post ciclónico en cultivos tropicales mediante índices espectrales", *Boletín técnico del INIVIT*, 15(3): 45-58, 2021, ISSN: 1028-3296, DOI: https://doi.org/10.20396/boletininivit.v13i3.45-58.

GONZÁLEZ, R.; MARTINEZ, L.: "Implementación de biodigestores de bajo costo en pequeñas fincas de La Habana. Estudio de Caso", *Pastos y Forrajes*, 42(3): 215-223, 2019.

GTZ: *Destsche Gesellschaft furTechnische Zusammenarbeit*, ZOPP: Planificación de proyectos orientada a objetivos. ESchborn, Alemania: GTZ, 1998.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.: "Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management.", 1999, ISSN: 0136268064.

HERNÁNDEZ, A.; MORALES, M.; CABRERA, A.; ASCANIO, M.: *Degradación de los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados de la llanura roja de la Habana y algunos resultados sobre su mejoramiento*, *[en línea]*, Ed. Ediciones INCA, San José de las Lajas Mayabeque, Cuba, 2014, ISBN: 978-959-7023-67-8, *Disponible en:* https://ediciones.inca.edu.cu.

INCA-CUBA: *Tecnologías de bioinsumos en Cuba. Recomendaciones nutricionales para suelos cubanos*, Inst. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2020.

INCA-CUBA: *Protocolos agroecológicos cubanos*, Inst. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2023.

INIA-CUBA: *Guía de biodigestores para pequeños productores*, Inst. INIA, 2020.

INIVIT-CUBA: *Requerimientos nutricionales de cultivos tropicales*, Inst. Instituto Nacional de Viandas Tropicales INIVIT, Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, Villa Clara, Cuba, 2023.

INSMET-CUBA: *Reportes de las estaciones metereológicas de Cuba*, Inst. Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba, La Habana, Cuba, 2025.

IPCC: *Guidelines for national greenhouse gas inventories*, Ed. repared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Published: IGES, Japan, repared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Published: IGES, Japan ed., Japan, 2019.

IS-CUBA: *Modelos de gestión circular de residuos orgánicos en fincas de Mayabeque, Cuba*, Ministerio de la agricultura, Instituto de Suelos, Informe técnico, La Habana, Cuba, 2023.

KVALE, S.: *Las entrevistas en investigación cualitativa*, Ed. Morata, 7ª Morata ed., Madrid, España, 2011, ISBN: 978-84-7112-655-7.

LASCANO, H.C.F.: "Gestión para el desarrollo de la economía circular", *Revista cubana Ekotermas*, 10(especial), 2024, ISSN: 2414-4681.

LÓPEZ, R.; GARCÍA, M.; MARTINEZ, J.: "Impacto de huracanes en la cobertura vegetal, análisis de cambios en el NDVI y umbrales de resiliencia en ecosistemas tropicales", *Revista Ciencias Ambientales*, 15(2): 45-60, 2020, DOI: https://doi.org/10.38142/ijesss.

MACHADO, M.; DIAZ, Y.; LEZCANO, J.C.: "Los sistemas agroforestales como base de la sostenibilidad en Cuba", *Pasto y Forraje*, 2017.

MMA-ONU: *Manual de bioinsumos para biofábricas de la Asociación de productores agroecológicos de las Islas de Maipo-APADIM*, *[en línea]*, ser. Ecodaya consultores, Inst. Ministerio del Medio Ambiente-ONU, Santiago de Chile, Financiado en el marco proyecto GEFSEC ID 5135, Santiago de Chile, Chile, 35 p., 2021, *Disponible en:* https://gefmontana.mma.gob.cl.

MORGAN, D.L.: *Focus groups as qualitative research*, Ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2nd Ed ed., 1997, ISBN: 978-0-7619-0343-7.

NC:39: *Catálogo de Normas Cubanas. APK". 2020*, *[en línea]*, Inst. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba, NC-CUBAPK, 1999, *Disponible en:* https://www.cubapk.com.

NC:10390: *Catálogo de Normas Cubanas. APK". 2020*, *[en línea]*, Inst. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba, NC-CUBAPK, 1999, *Disponible en:* https://www.cubapk.com.

NORIEGA, A.: *Biofábricas: La experiencia cubana*, *[en línea]*, Avance Agroindustrial 43-2 EEAOC ed., 44-46 p., 2024, ISBN: 0326-1131, *Disponible en:* https://www.eeaoc.gob.ar.

NÚÑEZ, J.R.; RUBIO, Z.S.; REYES, R.M.: "Capacitación sobre la extensión agraria en las cooperativas de producción agropecuarias Amistad Cuba- Nicaragua", *Revista de Gestión del Conocimiento y el Desarrollo local*, 7(3): 12, 2020.

OCDE-FAO: *Perspectivas Agrícolas 2020-2029*, Inst. OCDE-FAO, 2020.

PALM, C.A.; GACHENGO, C.N.; DELVE, R.J.; CADISCH, G.; GILLER, K.E.: "Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database", *Agriculture, ecosystems & environment*, 83(1-2): 27-42, 2001, ISSN: 0167-8809, DOI: https://doi.org/10.1016/so167-8809(96)01136-2.

PANEQUE, V.M.: *Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos*, Ed. Ediciones INCA, 2002, ISBN: 959-7023-51-2.

PÉREZ, A.; RODRÍGUEZ, M.; DÍAZ, C.: "Evaluación participativa de biofactorías comunitarias en la provincia de Granma", *Cultivos tropicales*, 42(2), 2021.

PONCE, H.R.: "Modelación de la dinámica de la materia orgánica del suelo en agroecosistemas tropicales", *Revistas Ciencias Agrícolas*, 23(1): 45-58, 2006.

QUIROGA, J.L.: "Bioeconomía: nuevo paradigma para el aprovechamiento de la agrodiversidad y los recursos naturales", En: *Conferencia Magistral Universidad Mayor de San Andrés, Sep. 2021*, San Andrés, 2021, DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13831.37280.

REYES, A.; PÉREZ, M.; DÍAZ, C.: *Experiencia de biofactorías comunitarias en Granma: lecciones aprendidas*, Inst. Ministerio de la agricultura, Instituto de Suelos, Informe Técnico en prensa, La Habana, Cuba.

RODRÍGUEZ, A.; PÉREZ, M.; DÍAZ, C.: "Metodología para el balance de nutrientes en finca agroecológicas de Cuba", *Pastos y forrajes*, 43(2), 2020, *Disponible en:* https://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v43n2/2078-8452-pyf-43-02-112.pdf.

ROSSET, P.M.; MACHÍN SOSA, B.; ROQUE JAIME, A.M.; ÁVILA LOZANO, D.R.: "The Campesino-to-Campesino agroecology movement of ANAP in Cuba: social process methodology in the construction of sustainable peasant agriculture and food sovereignty", *The Journal of peasant studies*, 38(1): 161-191, 2011, ISSN: 0306-6150.

SAFE: "A hierarchical framework for the asssessment of sustainabily levels", *Agriculture Ecosystems & Environment*, 120(2-4): 229-242, 2002, DOI: https://doi.org/10-1016/j.agee.2006.09.006.

SAN JUAN, Y.I.; RODRÍGUEZ, F.I.R.: "Modelos y herramientas para la vigilancia tecnológica", *Ciencias de la Información*, 47(2): 11-18, 2016, ISSN: 0864-4659.

SÁNCHEZ, P.A.: *Properties and management of soils in the Tropics*, Ed. Cambridge University Press, vol. Cap.9. Nutrient Cycling and soil Fertility, Cambridge, USA, 2019.

TAIZ, L.: "Plant physiology and development", 2025, ISSN: 019761423X.

TAPELLA, E.: *El mapeo de actores claves. Proyecto: Efectos de biodiversidad funcional sobre procesos ecossistémicos servicios ecosistémicos y sustentabilidad en las Américas: un abordaje interdisciplinario*, Inst. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Proyecto, Córdoba, Argentina, 2007.

TAURO, R.; GARCÍA, C.A.; SKUTSCH, M.; MASERA, O.: "The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82: 380-389, 2018, ISSN: 1364-0321, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ser.2017.09.036.

VELANDIA A, L.M.; RESTREPO, Y.C.: "¿Participación infantil o la profe manda?: una reflexión introspectiva desde la práctica docente", 2018.

VILLALPANDA, A.: "Manual guía de buenas prácticas de economía circular para una cadena alimentaria sostenible en Cuba", En: 2024, DOI: https://doi.org/10.13140/RG2.2.24785.03683.

YIN, R.K.: *Case Study research: design and methods*, Los Angeles: SAGE publications ed., vol. 30, vols. 1, Los Angeles, USA, 282 p., 2014, ISBN: 978-1-4522-4256-9.