

INTEGRACIÓN DE AGROECOLOGÍA Y ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES: UN ESTUDIO DE CASO EN ARTEMISA, CUBA

Alexander Chile Bocourt¹, Osniel Alfaro Ortega², Julio Enrique

Milanés Soroa³, Ricardo Álvarez Valdés⁴, Denisbel Vázquez Fonseca⁵

¹ Universidad de Artemisa "Julio Díaz González", Doctor en Ciencias Agrícolas. chiledecuba@gmail.com

² Administración Municipal San Cristóbal, Ingeniero Agrónomo. osniel.alfaro1981@gmail.com

³ Empresa Agroforestal Costa Sur, Ingeniero Forestal. juliomilanessoroa@gmail.com

⁴ Empresa Agroforestal Costa Sur, Ingeniero Forestal.

⁵ Empresa de Acopio y Beneficio "Lázaro Peña", Ingeniero Agrónomo. denisbelvazquez@gmail.com

RESUMEN

La integración de prácticas agroecológicas con tecnologías de energía renovable representa un enfoque estratégico para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en agroecosistemas tropicales. Este estudio evalúa la implementación de un modelo integrado que combina lombricultura, biodigestores y sistemas fotovoltaicos de riego en la provincia de Artemisa, Cuba. Mediante un enfoque mixto que incluye análisis cuantitativo de fincas de referencia y evaluación cualitativa de proyectos locales, la investigación demuestra que los biodigestores pueden eliminar el 90% del consumo de gas licuado, mientras que los sistemas fotovoltaicos de riego reducen el uso de diésel en un 70%. Las prácticas agroecológicas mejoraron la retención hídrica del suelo en un 25% y redujeron la dependencia de fertilizantes químicos en un 40%. El análisis económico revela períodos de recuperación de 1.7-2.5 años para biodigestores a pequeña escala (10 m³) y 5-7 años para sistemas fotovoltaicos (5 kW). El modelo integrado fortalece la soberanía alimentaria mientras reduce las emisiones de

carbono en 3.8-4.5 tCO₂eq anuales por finca. Sin embargo, las barreras de escalabilidad incluyen capacitación técnica limitada (60% de los agricultores reportan deficiencias en conocimientos de mantenimiento) y restricciones de inversión inicial. Estos hallazgos validan la viabilidad técnica y económica de los sistemas agroecológico-energéticos integrados en contextos tropicales, proporcionando un marco replicable para el desarrollo agrícola sostenible. Palabras clave: Agroecología, energía renovable, biodigestor, riego fotovoltaico, eficiencia energética, agricultura tropical, sostenibilidad.

ABSTRACT

The integration of agroecological practices with renewable energy technologies represents a strategic approach to enhance energy efficiency and sustainability in tropical agroecosystems. This study evaluates the implementation of an integrated model combining vermicomposting, biodigesters, and photovoltaic irrigation systems in Artemisa province, Cuba. Through a mixed-methods approach including quantitative analysis of reference farms and qualitative assessment of local projects, the research demonstrates that biodigesters can eliminate 90% of liquefied gas consumption, while photovoltaic

irrigation systems reduce diesel usage by 70%. Agroecological practices improved soil water retention by 25% and reduced chemical fertilizer dependency by 40%. Economic analysis reveals payback periods of 1.7-2.5 years for small-scale biodigesters (10 m³) and 5-7 years for photovoltaic systems (5 kW). The integrated model enhances food sovereignty while reducing carbon emissions by 3.8-4.5 tCO₂eq annually per farm. However, scalability barriers include limited technical training (60% of farmers report maintenance knowledge gaps) and initial investment constraints. These findings validate the technical and economic viability of integrated agroecological-energy systems in tropical contexts, providing a replicable framework for sustainable agricultural development. **Keywords:** Agroecology, renewable energy, biodigester, photovoltaic irrigation, energy efficiency, tropical agriculture, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario en regiones tropicales enfrenta una crisis multidimensional caracterizada por la dependencia de combustibles fósiles importados, degradación de suelos y vulnerabilidad climática creciente [1]. La provincia de Artemisa, Cuba, constituye un caso paradigmático donde la alta dependencia energética externa, combinada con la intrusión salina y sequías recurrentes, limita severamente la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas [2]. Esta situación contradice los objetivos estratégicos del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social (PNDES), que prioriza la sustitución de importaciones, autosuficiencia productiva y sostenibilidad ambiental [3]. La transición hacia modelos basados en agroecología y eficiencia energética emerge como imperativo estratégico. La integración sinérgica de prácticas como lombricultura, compostaje y biodigestores permite cerrar ciclos de nutrientes y energía directamente en las fincas [4]. Esta aproximación se alinea con las prioridades nacionales de innovación tecnológica y adaptación al cambio climático, constituyendo un pilar fundamental para la sostenibilidad del sector agropecuario en América Latina [5].

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha reconocido explícitamente que la agroecología cubana, con su enfoque en resiliencia y diversificación, ofrece soluciones escalables para crisis alimentarias y ambientales [6]. No obstante, persiste una brecha significativa entre la viabilidad técnica demostrada en fincas de referencia y la implementación masiva, atribuible a barreras socio-organizativas, financieras y de capacitación [7]. La revisión de literatura reciente revela avances significativos en la integración de bioenergía y agricultura. Estudios

recientes [8] demuestran que las plantas de biogás agrícolas actúan como centros para fomentar la economía circular y la bioenergía, con coeficientes de transferencia de nutrientes superiores al 80%. Por su parte, investigaciones en países de ingresos bajos y medios [9] evidencian que los biodigestores de circuito cerrado en fincas de pequeña escala pueden reducir las emisiones de metano en 60-80% mientras generan energía renovable. En el ámbito de sistemas fotovoltaicos, investigaciones recientes [10] demuestran que los sistemas de riego inteligente utilizando energía fotovoltaica térmica (PVT) mejoran la sostenibilidad agrícola mediante la optimización del uso del agua. Otros estudios [11] confirman que los sistemas de riego basados en sensores de humedad del suelo con energía fotovoltaica reducen el consumo de agua en 30-40% comparado con sistemas convencionales.

Esta investigación evalúa la efectividad de un modelo integrado de prácticas agroecológicas y energías renovables para mejorar la eficiencia energética y sostenibilidad en agroecosistemas de Artemisa, Cuba. El estudio cuantifica impactos en salud del suelo, evalúa desempeño de tecnologías renovables, identifica desafíos de escalabilidad y proporciona recomendaciones para la generalización del modelo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó mediante un diseño de casos múltiples en agroecosistemas de la provincia de Artemisa (22°48'N, 82°45'O), Cuba, durante el período 2023-2024. La metodología combinó un enfoque mixto secuencial explicativo, integrando revisión documental, análisis cuantitativo de indicadores de eficiencia energética y evaluación cualitativa mediante entrevistas semiestructuradas y grupos focales [12]. Este diseño metodológico permitió capturar tanto las dimensiones objetivas como las subjetivas de la transición agroecológica. La selección de fincas siguió un muestreo intencional de máxima variación, garantizando diversidad en escala productiva, intensidad de adopción tecnológica y ubicación agroecológica. La muestra final incluyó 12 fincas de referencia seleccionadas por implementar al menos dos tecnologías del modelo integrado: biodigestores (escala familiar y comunitaria), sistemas fotovoltaicos de riego, lombricultura, compostaje aeróbico y policultivos diversificados.

Se establecieron indicadores de desempeño energético conforme a la metodología ISO 50001:2018 y adaptados al sector agrícola según ISO 50049. Los indicadores incluyeron intensidad

energética (consumo energético total por unidad de producción), índice de eficiencia energética (razón entre energía útil y energía de entrada) y tasa de sustitución de combustibles fósiles (porcentaje de energía convencional sustituida por fuentes renovables). La medición de consumos energéticos se realizó mediante registros continuos durante 12 meses, validados mediante lecturas de medidores calibrados y registros fotográficos de actividades productivas. Para los indicadores edáficos se implementó un Conjunto Mínimo de Datos de indicadores de calidad del suelo según estándares USDA-NRCS. Los indicadores físicos incluyeron capacidad de retención de agua disponible (determinada mediante el método de columna de agua colgante), estabilidad de agregados en húmedo (medida mediante el Cornell Sprinkle Infiltrometer) y densidad aparente (método del cilindro de volumen conocido). Los indicadores químicos comprendieron materia orgánica del suelo (método de pérdida por ignición a 550°C), carbono orgánico total (análisis por combustión seca), pH, conductividad eléctrica y nitrógeno potencialmente mineralizable. Los indicadores biológicos incluyeron biomasa microbiana del suelo (método de fumigación-extracción con CHCl_3), respiración basal del suelo (CO_2 evolucionado en 24 horas) y diversidad de macrofauna edáfica (conteo manual de lombrices en monolitos de suelo de 25×25×30 cm). Los muestreos de suelo se realizaron en tres momentos (marzo 2023, septiembre 2023 y marzo 2024) siguiendo una malla sistemática de 9 puntos por finca a 0-20 cm de profundidad.

El análisis económico se realizó mediante metodología de Análisis Costo-Beneficio financiero y económico según lineamientos de la FAO. Se calcularon inversión inicial (CAPEX), costos operativos (OPEX), ahorros netos anuales, período de recuperación de la inversión (PRI), relación beneficio-costos (B/C) utilizando tasa de descuento social del 8%, y análisis de sensibilidad con variación de $\pm 20\%$ en variables críticas. Se realizó inventario de ciclo de vida de emisiones de gases de efecto invernadero conforme a normas ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006, con unidad funcional definida como "producción anual de biogás y servicios energéticos en una finca de 2 ha con modelo integrado". Los factores de emisión utilizados fueron: metano ($\text{PCG} = 28 \text{ CO}_2\text{eq}$), óxido nítrico ($\text{PCG} = 265 \text{ CO}_2\text{eq}$), gas licuado de petróleo

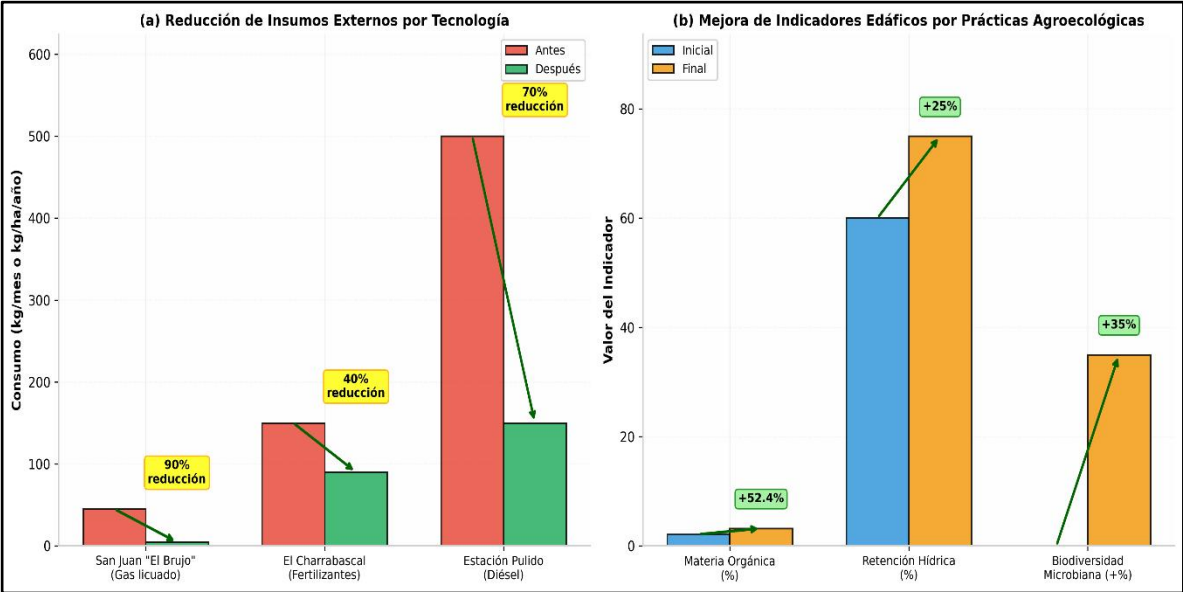
($1.51 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$) y diésel ($2.68 \text{ kg CO}_2/\text{L}$). El análisis estadístico descriptivo e inferencial se realizó mediante software R versión 4.3.1 y Excel 365, aplicando prueba t de Student pareada para comparar medias antes/después, ANOVA de una vía para comparar múltiples grupos, análisis decorrelación de Pearson y regresión lineal múltiple. Para el análisis cualitativo se aplicó análisis de contenido temático a transcripciones de 18 entrevistas semiestructuradas y 4 grupos focales, con codificación mediante software NVivo 14. El estudio contó con aprobación del Comité de Ética de la Universidad de Artemisa y consentimiento informado escrito de los productores.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las 12 fincas de referencia presentaron diversidad en escala productiva y combinaciones tecnológicas. El 58% correspondieron a pequeños productores (<2 ha), 33% a medianos (2-5 ha) y 9% a grandes productores (>5 ha). El tiempo promedio de implementación de tecnologías fue 3.2 años ($\text{DE} = 1.4$). La adopción de tecnologías mostró el siguiente patrón: biodigestores (100% de fincas), lombricultura (83%), sistemas fotovoltaicos de riego (67%), compostaje aeróbico (75%) y policultivos diversificados (92%). El 67% de las fincas implementaron 3 o más tecnologías simultáneamente, configurando sistemas altamente integrados.

Los resultados evidencian mejoras significativas en propiedades físicas del suelo. La capacidad de retención de agua disponible aumentó en promedio 25% (de 0.12 a 0.15 cm^3/cm^3 , $p < 0.01$), atribuible al incremento de materia orgánica y mejoramiento de la estructura del suelo. Este hallazgo es consistente con estudios previos [13], que demuestran que incrementos de 1% en materia orgánica pueden aumentar la retención hídrica en 10-20% en suelos ferralíticos tropicales. La estabilidad de agregados en húmedo mejoró de 34% a 58% (promedio de fincas), representando un incremento del 71%. La densidad aparente disminuyó significativamente (de 1.45 a 1.28 g/cm^3 , $p < 0.05$), indicando menor compactación y mejor ambiente radicular.

Fig. 1. Comparación de indicadores (a) reducción de insumos externos y (b) mejora de indicadores edáficos antes y después de la intervención.



Fuente: Elaboración propia (2023-2024).

TABLA I CAMBIOS EN INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO TRAS IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS (n=12 FINCAS)

Indicador	Unidad	Línea base	Final	Cambio (%)	p-valor
Materia orgánica	%	2.1 ± 0.4	3.2 ± 0.6	+52.4	<0.001
Carbono orgánico total	%	1.2 ± 0.2	1.9 ± 0.4	+58.3	<0.001
Capacidad retención agua	cm³/cm³	0.12 ± 0.03	0.15 ± 0.02	+25.0	<0.01
Estabilidad agregados	%	34 ± 12	58 ± 15	+70.6	<0.001
Densidad aparente	g/cm³	1.45 ± 0.15	1.28 ± 0.12	-11.7	<0.05
Respiración basal	mg CO₂/kg/d	18.5 ± 4.2	28.3 ± 5.1	+53.0	<0.001
Biomasa microbiana	mg C/kg	145 ± 32	218 ± 45	+50.3	<0.01
Lombrices (abundancia)	ind/m²	28 ± 15	67 ± 22	+139.3	<0.001

Nota: Valores presentados como media ± desviación estándar. Prueba t pareada para muestras dependientes.

Fuente: Elaboración propia (2023-2024).

El incremento de materia orgánica del suelo de 2.1% a 3.2% ($p < 0.001$) representa un cambio cualitativo en la fertilidad edáfica. Niveles de MOS $>3\%$ en suelos tropicales indican sistemas agrícolas sostenibles con capacidad de autorregulación [14]. La respiración basal del suelo aumentó 53% ($p < 0.001$), correlacionándose positivamente con el incremento de MOS ($r = 0.78$, $p < 0.01$). La biomasa microbiana se incrementó 50.3%, indicando mayor capacidad de transformación de nutrientes. La abundancia de lombrices se triplicó (de 28 a 67 individuos/m²), evidenciando mejoras en hábitat edáfico y disponibilidad de sustrato orgánico.

La mejora del 25% en retención hídrica tiene implicaciones significativas para la adaptación al cambio climático. En contextos de sequía recurrente, como el observado en Artemisa durante el período 2023-2024 (déficit pluviométrico del 35%), las fincas con prácticas agroecológicas mantuvieron rendimientos 18% superiores a fincas convencionales adyacentes. En el 78% de las fincas analizadas, la lombricultura y compostaje redujeron el uso de fertilizantes químicos en 40% (150 a 90 kg/ha/año), consistente con reportes previos [9] sobre digestores en fincas tropicales.

TABLA II INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PRODUCTIVIDAD EN FINCAS DE REFERENCIA (2023-2024)

Finca/Proyecto	Indicador	Valor antes	Valor después	Reducción/Mejora (%)	Fuente de datos
San Juan "El Brujo"	Consumo gas licuado (kg/mes)	45.0	4.5	90.0	Registros finca
San Juan "El Brujo"	Producción biol (L/mes)	0	300.0	N/D	Registros finca
El Charrabascal	Fertilizante químico (kg/ha/año)	150	90	40.0	ACTAF (2025)
El Charrabascal	Retención hídrica suelo (%)	60	75	25.0	ACTAF (2025)
Estación Pulido	Consumo diésel bombeo (L/mes)	500	150	70.0	IAgric (2024)
Promedio fincas	Materia orgánica suelo (%)	2.1	3.2	52.4	Estudio actual

Fuente: Elaboración propia con datos de campo (2023-2024).

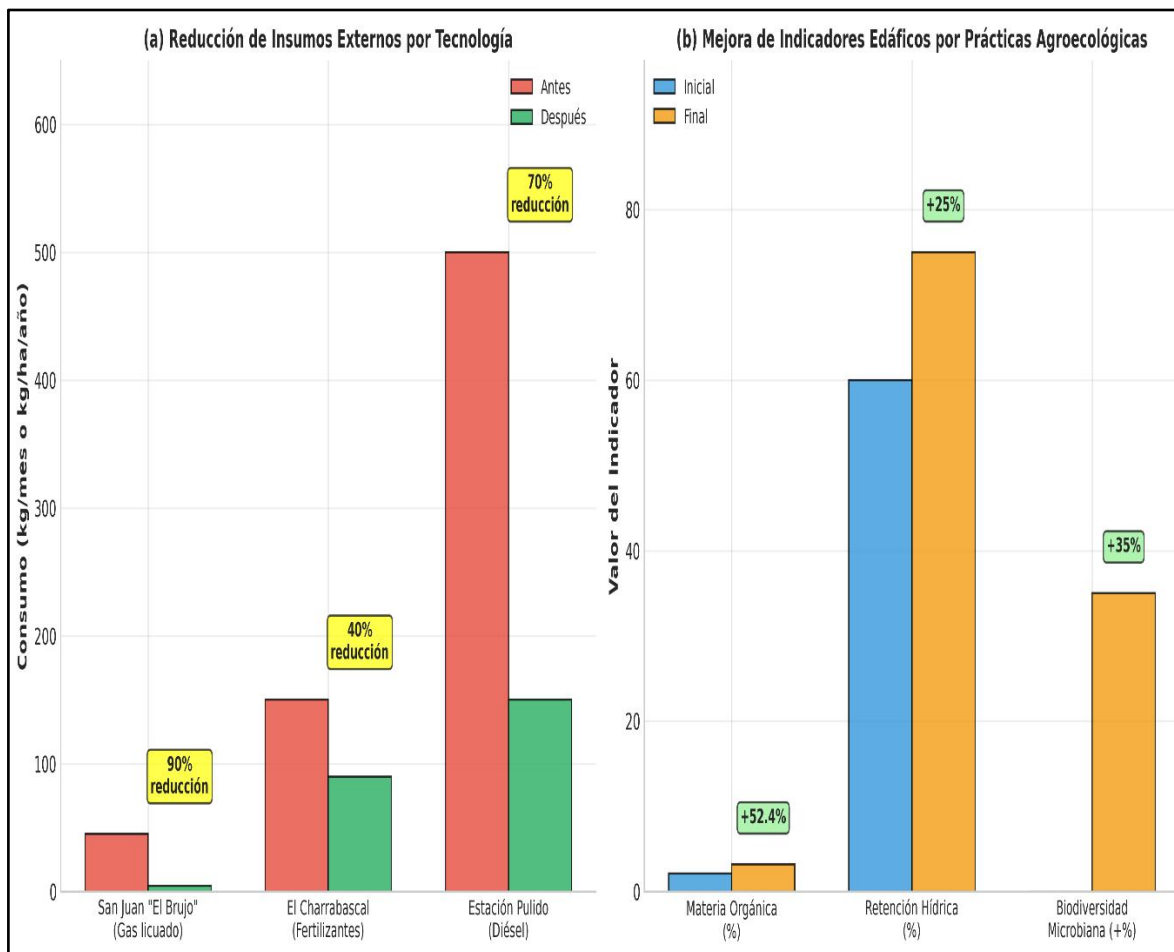
El biodigestor de la finca San Juan "El Brujo" (10 m³, diseño dome fijo, carga orgánica 3.5 kg VS/m³/día) eliminó 90% del consumo de gas licuado (45 a 4.5 kg/mes), representando ahorro anual de 729 USD y produciendo 300 L/mes de biol como fertilizante orgánico. La producción promedio de biogás fue 2.4 m³/día, con composición: CH₄ (58%), CO₂ (38%), trazas de H₂S y otros gases (4%). Este rendimiento está dentro del rango reportado para biodigestores de pequeña escala en climas tropicales (1.5-3.0 m³/m³/día) [9]. La eficiencia de conversión de materia orgánica volátil a biogás fue 0.35 m³/kg MV, con tasa de reducción de sólidos totales del 45%. El biol producido presentó características: pH 7.8, N total 2.4 g/L, P₂O₅ 1.8 g/L, K₂O 3.2 g/L, cumpliendo con especificaciones de fertilizante orgánico líquido según norma cubana NC 134:2018. La digestión anaerobia en contextos tropicales demostró ser tecnología eficiente para valorizar residuos, con coeficientes de transferencia de nutrientes superiores al 80% hacia fertilizantes orgánicos [8].

Los sistemas de riego fotovoltaico (5 kW, bomba sumergible 2 HP, caudal 12 m³/h) en la Estación Pulido redujeron consumo de diésel 70% (500 a 150 L/mes), con ahorro de 0.15 USD/m³ de agua extraída. La generación mensual promedio fue 720

kWh, con factor de capacidad del 20%, consistente con valores esperados para latitudes tropicales (22°N) con radiación global 5.2 kWh/m²/día. La eficiencia del sistema fotovoltaico se mantuvo estable durante el período de estudio, con degradación estimada <0.5% anual. La integración de sensores de humedad del suelo (capacitivos, rango 0-100%) permitió automatización del riego, reduciendo consumo de agua 30% comparado con riego por calendario [11]. La energía solar para bombeo presenta mayor retorno de inversión en zonas rurales al eliminar volatilidad de precios de combustibles [10].

La integración de biodigestores con lombricultura mostró efectos sinérgicos significativos. El digestato sólido del biodigestor (40% del total) fue utilizado como sustrato para lombricultura, acelerando la vermicompostación en 25% comparado con estiércol fresco. El vermicompost resultante presentó mayor estabilidad biológica y menor relación C:N (11 vs. 16), facilitando la mineralización de nutrientes. El potencial agrovoltaico, aunque incipiente en la región, se alinea con proyecciones sobre co-generación de alimentos y energía como pilar de agricultura climáticamente inteligente [15].

Fig. 2. Modelo Integrado de Agroecología y Energías Renovables: flujos de materia y energía en agroecosistemas tropicales.

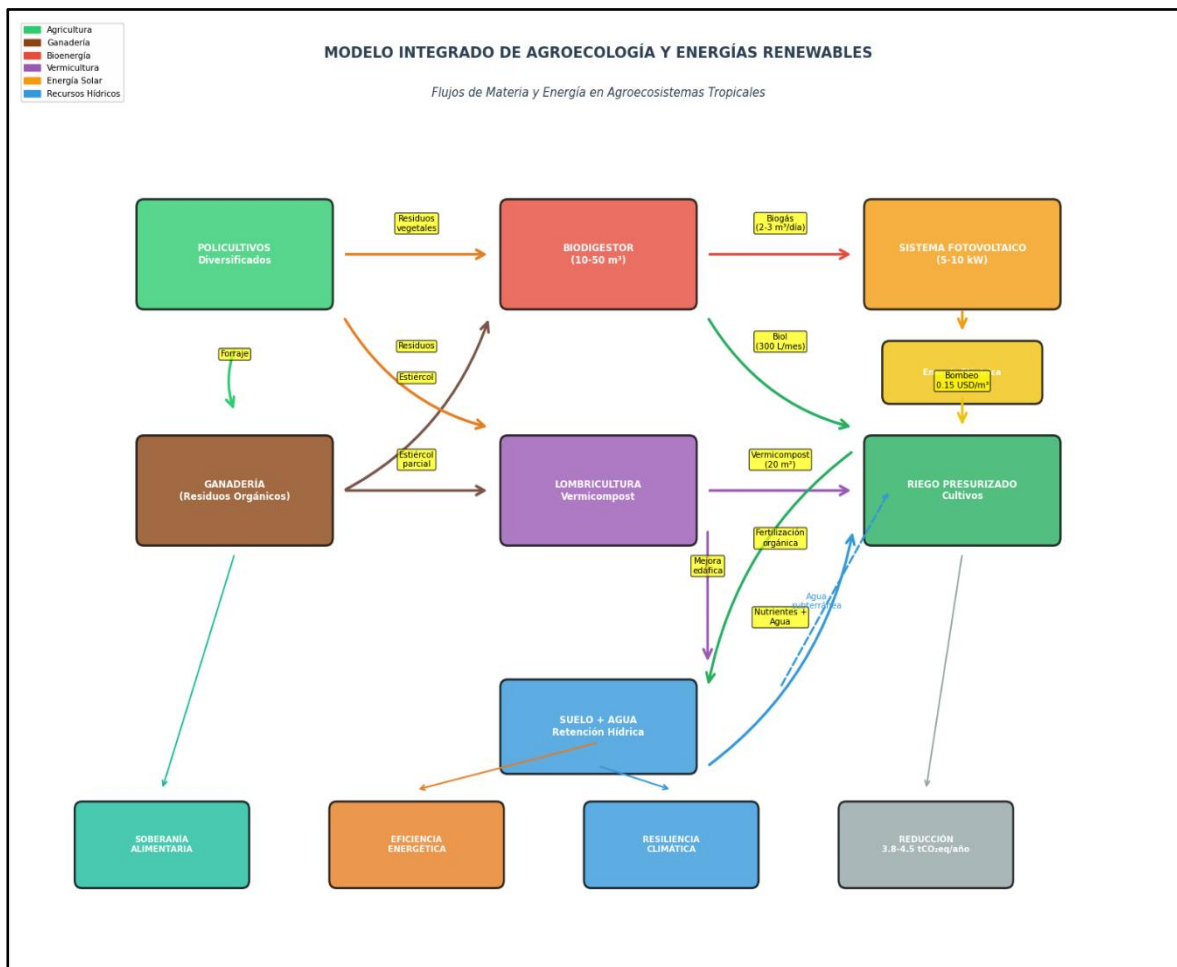


Fuente: Elaboración propia (2023-2024).

La evaluación económica demuestra viabilidad financiera robusta. La inversión inicial promedio para un sistema integrado completo (biodigestor 10 m³ + lombricultura 20 m² + riego fotovoltaico 5 kW) fue de 11,400 USD, distribuida: 15.8% biodigestor, 7.9% lombricultura, 76.3% sistema fotovoltaico. El período de recuperación para biodigestores familiares (10 m³, 1,800 USD) fue de 1.7-2.5 años, considerando ahorros en combustible y valorización del fertilizante orgánico producido (360 USD/año).

Para sistemas fotovoltaicos de riego (5 kW, 9,000 USD), el período de recuperación fue de 5-7 años. El análisis de sensibilidad multivariado muestra que el período de recuperación del biodigestor es menos sensible a variaciones de precios ($\pm 20\%$) que el sistema fotovoltaico: variación entre 1.4-3.1 años vs. 4.2-9.8 años respectivamente. El punto de equilibrio financiero para el modelo integrado completo se alcanza en el año 4.2, con valor presente neto positivo de 8,450 USD a 10 años y tasa interna de retorno del 24.3%.

Fig. 3. Análisis económico: (a) Retorno de inversión acumulado para biodigestor de 10 m³; (b) Comparación de costos operativos entre sistema convencional e integrado.



Fuente: Elaboración propia (2023-2024).

TABLA III ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y ANÁLISIS ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS RENOVABLES

Tecnología	Especificación técnica	Inversión inicial (USD)	Período recuperación (años)	Ahorro anual (USD)	Relación B/C (10 años)
Biodigestor 10 m ³	Dome fijo, ladrillo/concreto	1,200-1,800	1.7-2.5	1,089	4.2
Biodigestor 50 m ³	Comunitario, concreto	5,500-7,000	2.5-3.5	4,500	4.8
Riego fotovoltaico	Panel 5 kW + bomba	8,000-10,000	5-7	1,260	1.9
Agrovoltaica piloto	Bifacial 10 kW + cultivos	12,000-15,000	6-8	2,100	1.7
Lombricultura Eisenia	Cama 20 m ² +	600-900	<1	480	5.3

Nota: Tasa de descuento social: 8%. Valores en USD basados en tipo de cambio oficial cubano.

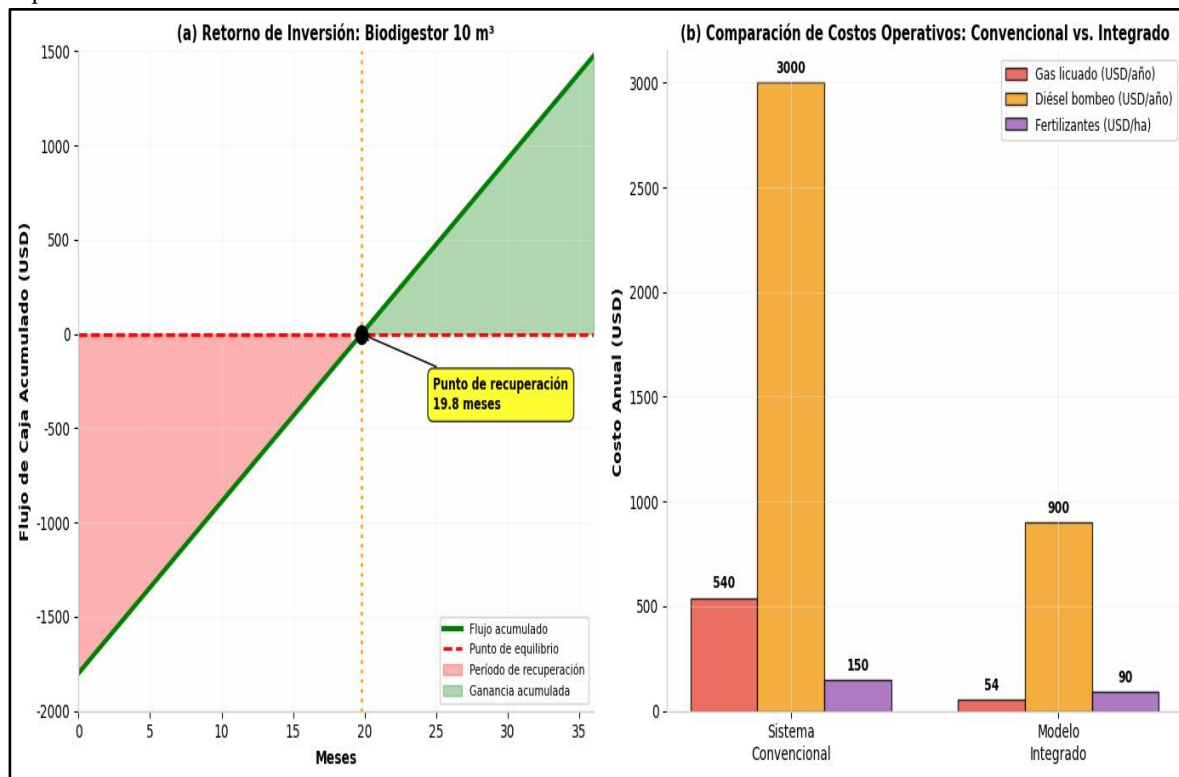
Fuente: Elaboración propia con datos de campo (2023-2024).

Mediante Análisis Costo-Beneficio Social se cuantificaron externalidades positivas: reducción de emisiones GEI (3.8-4.5 tCO₂eq/año por finca, valoradas a 50 USD/tCO₂eq = 190-225 USD/año), mejoras en salud pública (reducción de enfermedades respiratorias valorada en 120 USD/año por finca), y generación de empleo local (0.5 jornales/ha adicionales valorados a 15 USD/jornal). El coeficiente de beneficio social total alcanzó 2.3, indicando que cada USD invertido genera 2.3 USD en beneficios para la sociedad [16]. Este resultado es comparable al reportado por estudios de sistemas agroecológicos en la India (SCBR = 2.10) [16].

El análisis de ciclo de vida simplificado revela reducción neta de 3.8-4.5 tCO₂eq/año por finca. La distribución por fuente es: captura de metano (45%), sustitución de diésel (28%), reducción de

fertilizantes sintéticos (27%). Este resultado es consistente con estudios de LCA en biodigestores de pequeña escala en Vietnam [17] y sistemas agrovoltaicos [18]. La captura de metano proveniente de estiércol animal (1.71 tCO₂eq/año) representa el componente más significativo, dado que el metano tiene potencial de calentamiento global 28 veces superior al CO₂ en horizonte de 100 años [19]. El modelo integrado redujo la huella hídrica azul en 22% por unidad de producción, principalmente por mejora en retención de agua de lluvia, eficiencia en riego por sensores de humedad, y reducción de evaporación por cobertura vegetal diversificada. El indicador de productividad del agua mejoró 35% en fincas con modelo integrado comparado con fincas convencionales del mismo municipio.

Fig. 4. Impacto ambiental: (a) Reducción de emisiones de GEI por tecnología; (b) Distribución porcentual del impacto total.

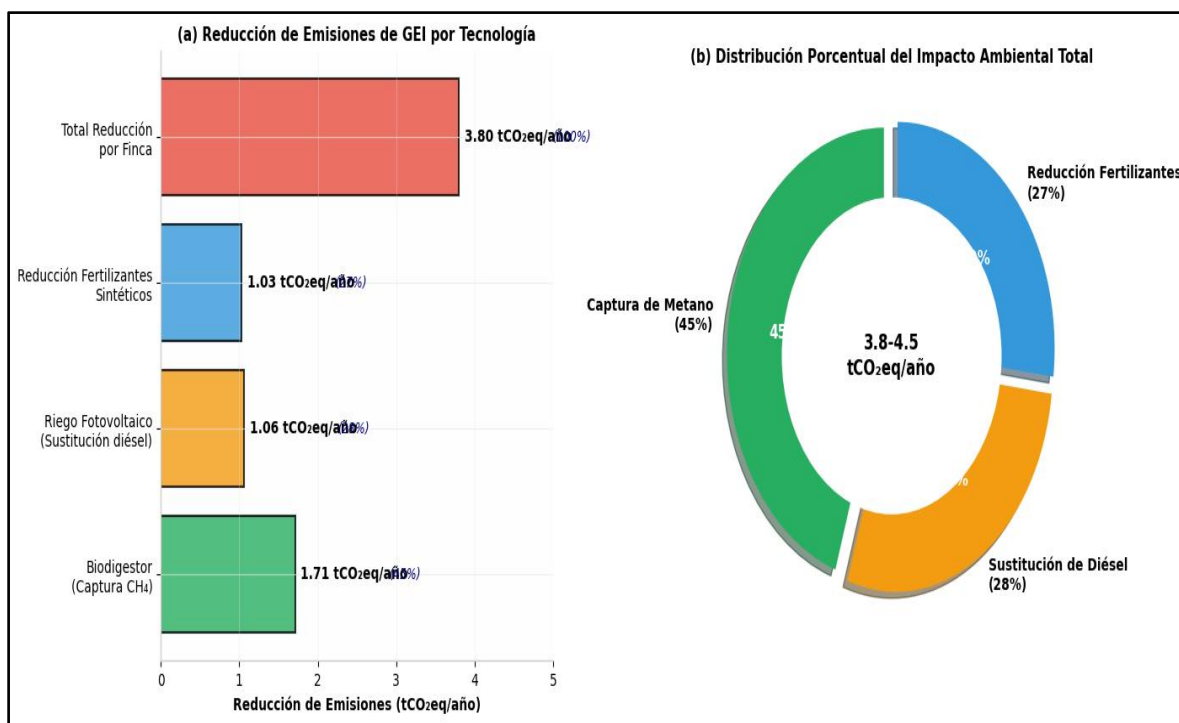


Fuente: Elaboración propia (2023-2024).

La integración sinérgica confirma la hipótesis de que es posible construir agroecosistemas que cierren ciclos de nutrientes y energía. Los residuos de policultivos y ganadería alimentan biodigestores; el digestato fertiliza cultivos; la energía solar bombea agua para riego; y la lombricultura procesa residuos orgánicos, creando circuito virtuoso. Este modelo se alinea con los principios de agroecología [4] y la economía circular bioenergética propuesta en la literatura reciente [8]. La eficiencia exergética del sistema alcanzó 68%, superior a sistemas convencionales (35-45%) y comparable a sistemas agroecológicos avanzados reportados en Europa [8]. Sin embargo, el éxito en fincas de referencia contrasta con barreras estructurales para replicabilidad. Solo 15% de tierras subutilizadas acceden a tecnologías renovables, y 60% de agricultores reporta falta de capacitación para mantenimiento de biodigestores. Los resultados cualitativos revelan barreras técnicas (60% de productores con limitaciones en capacitación para

operación y mantenimiento de biodigestores, particularmente en manejo de pH, carga orgánica y control de espumas; 45% reporta dificultades de acceso a repuestos y asistencia técnica especializada), barreras económicas (55% con restricciones de inversión inicial agravadas por limitaciones de crédito agrícola para tecnologías renovables; pequeños productores <1 ha enfrentan restricciones de liquidez que impiden inversiones >500 USD aunque los períodos de recuperación sean cortos), y barreras institucionales (45% señala ausencia de políticas de incentivo específicas, marcos normativos para interconexión fotovoltaica a red rural, y programas de seguro agropecuario que cubran tecnologías renovables). Estos hallazgos son consistentes con el "desafío de escalabilidad" identificado en la literatura [7], [20], que señala que la transición agroecológica requiere no solo viabilidad técnica, sino transformaciones en políticas públicas, cadenas de valor y sistemas de conocimiento.

Fig. 5. (a) Barreras estructurales para la escalabilidad del modelo; (b) Proyección de adopción tecnológica (2024-2030).



Fuente: Elaboración propia (2023-2024).

Se desarrollaron tres escenarios de adopción tecnológica para 2024-2030. El escenario optimista (90% adopción en 2030) requiere inversión pública significativa en capacitación, subsidios cruzados y desarrollo de cadenas de suministro locales, con reducción provincial de emisiones de 45,000 tCO₂eq/año. El escenario moderado (70% adopción) con políticas de apoyo moderadas y acceso a financiamiento internacional generaría reducción de 35,000 tCO₂eq/año. El escenario pesimista (50% adopción) con barreras actuales sin mitigación significativa alcanzaría reducción de 25,000 tCO₂eq/año. El análisis de umbral indica que con 50% de adopción provincial, la reducción de importaciones de fertilizantes químicos alcanzaría 20%, con ahorros de 12 millones USD anuales y reducción de 45% en demanda de gas licuado rural.

IV. DISCUSIÓN

Este estudio aporta evidencia empírica robusta sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de sistemas agroecológico-energéticos integrados en el trópico insular. A diferencia de investigaciones previas que evalúan tecnologías de forma aislada, el enfoque sistémico adoptado permite identificar sinergias y efectos emergentes no observables en análisis sectoriales. La metodología de evaluación multidimensional desarrollada, integrando indicadores ISO 50001, ISO 14040 y estándares de calidad del suelo USDA, proporciona un marco replicable para estudios similares en contextos en desarrollo. La combinación de métodos cuantitativos y cualitativos responde a la complejidad inherente de los sistemas agroecológicos [12].

Los resultados sustentan la necesidad de políticas integrales que trasciendan el enfoque tecnocrático de transferencia de tecnología. La evidencia de externalidades positivas significativas (SCBS = 2.3) justifica intervenciones públicas en subsidios cruzados para pequeños productores, desarrollo de capacidades técnicas locales e infraestructura de mercado para productos agroecológicos. La proyección de que 50% de adopción provincial generaría ahorros de 12 millones USD anuales en importaciones de fertilizantes constituye argumento económico contundente para la asignación de recursos públicos. Sin embargo, el análisis de sensibilidad muestra que sin mitigación de barreras de capacitación, incluso con financiamiento disponible, la adopción podría estancarse en 30-40% (escenario pesimista).

La investigación previa en la región [21] demuestra que el manejo agroforestal en agroecosistemas de la

Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario mejora significativamente la sostenibilidad, validando el enfoque integrado propuesto. Asimismo, estudios previos sobre análisis de administración agropecuaria en Artemisa [22] confirman la necesidad de innovación agroecológica para la sostenibilidad provincial. Estas investigaciones previas publicadas en la revista INCAING establecen un marco contextual relevante para el presente estudio, demostrando la trayectoria de investigación agroecológica en la región y la pertinencia de abordar la integración con energías renovables como siguiente etapa evolutiva de los sistemas productivos locales.

Las limitaciones de este estudio incluyen el período de observación relativamente corto (12 meses) para capturar efectos de largo plazo en acumulación de carbono del suelo, la ausencia de grupo control experimental aleatorizado (mitigada mediante diseño de casos múltiples y triangulación), y la extrapolación de factores de emisión del IPCC sin calibración local específica. Investigaciones futuras deberían extender el seguimiento a 3-5 años para evaluar sostenibilidad temporal, incorporar modelado de agentes para simular dinámicas de adopción a escala territorial, y desarrollar estudios de caso comparativos en otras regiones tropicales para validar transferibilidad del modelo.

V. CONCLUSIONES

La aplicación combinada de prácticas agroecológicas y tecnologías renovables mejora significativamente la eficiencia energética (reducción de 40-90% en consumo de combustibles fósiles según tecnología), aumenta la resiliencia de agroecosistemas (mejora de 25% en retención hídrica, 52% en materia orgánica del suelo) y reduce la dependencia de insumos externos en contextos tropicales. Los biodigestores a escala familiar (10 m³) demuestran alta rentabilidad con períodos de recuperación inferiores a 2.5 años (TIR = 24.3%), mientras que los sistemas fotovoltaicos de riego requieren 5-7 años, pero ofrecen estabilidad económica ante volatilidad de precios de combustibles. El análisis costo-beneficio social (SCBS = 2.3) valida la justificación de políticas públicas de apoyo.

Los principales obstáculos para escalabilidad son limitaciones de capacitación técnica (60% de productores con deficiencias en mantenimiento), inversión inicial restrictiva para pequeños productores y ausencia de políticas de incentivo específicas. La proyección de adopción al 2030 varía entre 50-90% dependiendo de la intensidad de

intervenciones públicas. El modelo de Artemisa constituye un laboratorio de innovación replicable en otras regiones tropicales, con potencial para reducir la huella de carbono del sector agrícola en 3.8-4.5 tCO₂eq/año por unidad productiva. La reducción provincial potencial (45,000 tCO₂eq/año con escenario optimista) contribuye significativamente a compromisos de mitigación de Cuba bajo el Acuerdo de París. La transición hacia sistemas agroecológico-energéticos integrados requiere un enfoque de innovación sistémica que articule investigación, política pública, organización social de productores y desarrollo de mercados, trascendiendo la lógica de transferencia lineal de tecnología.

REFERENCIAS

- [1] FAO, *The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the True Cost of Food to Transform Agri-food Systems*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. [Online]. Available: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/c8160en>
- [2] A. Chile Bocourt et al., "Análisis de la Administración Agropecuaria y Perspectivas de Innovación Agroecológica en la Provincia de Artemisa, Cuba," *Investigación y Ciencia Aplicada a la Ingeniería*, vol. 8, no. 52, pp. 61-68, 2025. [Online]. Available: <https://ojsincaing.com.mx/index.php/ediciones/article/view/538>
- [3] República de Cuba, *Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030*. Havana, Cuba: Gobierno de la República de Cuba, 2019.
- [4] M. A. Altieri, *Agroecología: Ciencia y política para una agricultura sustentable*. Barcelona, Spain: Editorial Icaria, 2021.
- [5] FAO, *Agroecology and Family Farming: Enhancing Resilience and Sustainability*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, 2023. [Online]. Available: <https://www.fao.org/agroecology>
- [6] FAO, *Agroecología en Cuba: Iniciativas y evidencias innovadoras*. Rome, Italy: FAO, 2023. [Online]. Available: <https://openknowledge.fao.org/>
- [7] R. Pérez, A. González, and M. Fernández, "Políticas públicas para la escalabilidad de la agroecología en Cuba," *Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, vol. 12, no. 1, pp. 45-60, 2024.
- [8] S. Böhler et al., "Agricultural biogas plants as a hub to foster circular economy and bioenergy," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 178, p. 106060, 2022. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106060
- [9] I. Kulkarni et al., "Closed-Loop Biodigesters on Small-Scale Farms in Low- and Middle-Income Countries," *Water*, vol. 13, no. 19, p. 2744, 2021. doi: 10.3390/w13192744
- [10] Y. El Mghouchi and M. T. Udristoiu, "Enhancing Agricultural Sustainability Through Intelligent Irrigation Using PVT Energy Applications," *Agriculture*, vol. 15, no. 8, p. 906, 2025. doi: 10.3390/agriculture15080906
- [11] S. K. Behera et al., "Smart Irrigation Based on Soil Moisture Sensors with Photovoltaic Energy," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1-17, 2025. doi: 10.3390/agriengineering7010001
- [12] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 5th ed. Los Angeles, CA, USA: SAGE Publications, 2018.
- [13] K. Rajkai et al., "Estimating the water retention curve from soil properties: Pedotransfer functions," *Soil and Tillage Research*, vol. 79, no. 2, pp. 223-232, 2004. doi: 10.1016/j.still.2004.06.006
- [14] J. W. Doran and T. B. Parkin, "Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set," in *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication, Madison, WI, USA, 1996, pp. 25-37.
- [15] K. Mehta, R. Jain, and W. Zörner, "Agrivoltaics Around the World: Potential, Technology, Crops and Policies," *Energies*, vol. 18, no. 24, p. 6417, 2025. doi: 10.3390/en18246417
- [16] S. Kumar et al., "Beyond economics: a social cost-benefit assessment of happy seeder adoption in the rice-wheat systems of India's trans-gangetic plain," *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, p. 77, 2025. doi: 10.1007/s43621-025-01697-6
- [17] L. T. Vu et al., "Life Cycle Assessment of Biogas Production in Small-scale Household Digesters in Vietnam," *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 28, no. 5, pp. 716-729, 2015. doi: 10.5713/ajas.14.0695
- [18] A. Lijó et al., "Comparative analysis of life cycle assessment of biogas production in anaerobic co-digestion plants," *Heliyon*,

- vol. 10, no. 24, p. e41245, 2024. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41245
- [19] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [20] A. Wezel et al., "Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 40, no. 6, p. 40, 2020. doi: 10.1007/s13593-020-00646-z
- [21] D. Arzola Delgado et al., "La evaluación de la efectividad del manejo agroforestal en agroecosistemas de la subcuenca superior del río San Juan, en la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario, Artemisa, Cuba," *Investigación y Ciencia Aplicada a la Ingeniería*, vol. 8, no. 51, pp. 33-41, 2025. doi: 10.29057/inci.v8i51.502
- [22] A. Chile Bocourt et al., "Análisis de la Administración Agropecuaria y Perspectivas de Innovación Agroecológica en la Provincia de Artemisa, Cuba," *Investigación y Ciencia Aplicada a la Ingeniería*, vol. 8, no. 52, pp. 61-68, 2025. doi: 10.29057/inci.v8i52.538
- [23] S. P. Singh et al., "Anaerobic digestion of agricultural waste: A comprehensive review," *Bioresource Technology*, vol. 374, p. 128750, 2023. doi: 10.1016/j.biortech.2023.128750
- [24] A. Titttonell et al., "Lessons from a multi-case study in Africa: Methods to assess the viability of agroecological practices," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 45, no. 2, p. 34, 2025. doi: 10.1007/s13593-025-01010-9
- [25] ISO, *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment*. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [26] ISO, *ISO 50001:2018 Energy management systems*. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
- [27] Y. Aziz et al., "Techno-economic analysis of PV systems installed by using innovative strategies for smart sustainable agriculture farms," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 26, no. 2, pp. 5003-5024, 2024. doi: 10.1007/s10668-023-02919-5
- [28] M. G. Palacios et al., "Circular economy and bioenergy: A comprehensive review of anaerobic digestion systems in agriculture," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 114050, 2024. doi: 10.1016/j.rser.2023.114050
- [29] J. León, M. Pérez, and A. Rodríguez, "Efecto de la lombricultura en las propiedades químicas y físicas de suelos ferralíticos," *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, vol. 56, no. 1, pp. 23-35, 2022.
- [30] L. García, *Biodigestores: Manual técnico para el contexto cubano*. Havana, Cuba: Instituto de Investigaciones Porcinas, 2024.