ECOCULTURE PROYECTO AGROVOLTAICO

Laura Nicol Pantevis Ramírez

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

27/10/2026

Resumen

El presente trabajo propone el diseño de un sistema integrado de producción de alimentos para Ecoculture en San Andrés Islas, que combina captación y almacenamiento de aguas lluvias, hidroponía mediante técnica de película nutritiva (NFT), cultivo en sustrato con riego por goteo, acuaponía con tilapia y suministro eléctrico solar para equipos de bombeo y monitoreo. La propuesta responde a desafíos territoriales como la dependencia de alimentos transportados desde el continente, la disponibilidad limitada de agua dulce, la escasez de suelo agrícola y la necesidad de vincular el turismo con experiencias educativas y regenerativas.

Desde la Ingeniería Industrial, el proyecto se aborda mediante diseño de procesos, estimación de recursos, evaluación preliminar de costos, gestión de proveedores, mantenimiento preventivo e indicadores de desempeño. Se plantea una estructura modular, replicable y demostrativa que pueda funcionar como aula viva para residentes, estudiantes, visitantes y operadores turísticos. El presupuesto preliminar aportado para la estructura base asciende a COP $6.157.000, sin incluir todos los componentes solares, baterías, mano de obra, transporte, permisos ni costos de operación; por tanto, debe actualizarse mediante cotizaciones locales antes de una decisión de inversión.

La investigación se plantea como aplicada, descriptiva y de diseño tecnológico, con validación posterior mediante un piloto. No se presentan como resultados comprobados las metas de ahorro de agua, productividad o reducción de emisiones; estas deberán medirse con una línea base y registros operativos. Se concluye que el proyecto tiene potencial educativo, productivo y comunitario, siempre que se resuelvan previamente la calidad del agua, la resiliencia energética, la bioseguridad acuícola, la protección ante corrosión salina y la viabilidad económica.

Palabras clave: Ingeniería Industrial, hidroponía, agrovoltaica, acuaponía, economía circular, seguridad alimentaria, turismo regenerativo, San Andrés.

Abstract

This applied research proposes an integrated food-production system for Ecoculture in San Andrés Island, combining rainwater harvesting, NFT hydroponics, substrate cultivation with drip irrigation, tilapia aquaponics, and solar electricity for pumping and monitoring. From an Industrial Engineering perspective, the project includes process design, resource planning, preliminary budgeting, supplier management, preventive maintenance, and performance indicators. The proposal is intended as a modular demonstration and educational system. Its expected impacts must be validated through a pilot, water and energy baselines, crop records, and financial evaluation.

Keywords: Industrial Engineering, hydroponics, agrivoltaics, aquaponics, circular economy, food security, regenerative tourism.

Tabla de contenido

Contenido

Introducción 7

1. Planteamiento del problema 8

1.1 Descripción del problema 8

1.2 Pregunta de investigación 8

1.3 Sistematización del problema 8

2. Objetivos 9

2.1 Objetivo general 9

2.2 Objetivos específicos 9

3. Justificación 10

3.1 Justificación ambiental 10

3.2 Justificación social y alimentaria 10

3.3 Justificación económica y turística 10

3.4 Justificación desde Ingeniería Industrial 11

4. Marco referencial 11

4.1 Contexto territorial 11

4.2 Fundamentos técnicos 11

4.3 Ingeniería Industrial y sostenibilidad 13

5. Preguntas críticas para Ecoculture 13

6. Metodología 14

6.1 Enfoque y tipo de investigación 14

6.2 Fases 14

6.3 Técnicas e instrumentos 15

6.4 Alcance y limitaciones 16

7. Propuesta técnica del sistema 16

7.1 Arquitectura funcional 16

7.2 Diseño y dimensiones preliminares 17

7.3 Selección de cultivos 19

7.4 Operación y mantenimiento 20

7.5 Integración turística y educativa 22

8. Gestión de proveedores y abastecimiento 22

9. Presupuesto preliminar 23

9.1 Evaluación económica propuesta 25

10. Indicadores de desempeño 25

11. Riesgos y medidas de control 27

12. Plan de implementación 29

13. Acción concreta de participación desde Ingeniería Industrial 30

14. Resultados esperados y discusión 30

15. Conclusiones proyectadas 31

16. Recomendaciones 32

Referencias y fuentes por verificar 33

Anexo A. Lista de chequeo previa a la construcción 34

Anexo B. Formato básico de registro diario 34

Anexo C. Formato de cosecha y costos 35

Introducción

La sostenibilidad de los sistemas alimentarios insulares depende de la capacidad de producir, distribuir y aprovechar alimentos utilizando responsablemente los recursos disponibles. En San Andrés Islas, el transporte de productos desde el territorio continental, la presión sobre el agua dulce, la disponibilidad limitada de suelo cultivable y las condiciones de humedad, temperatura y salinidad ambiental representan factores que deben considerarse al diseñar alternativas productivas.

Ecoculture plantea una oportunidad para conectar producción local de alimentos, educación ambiental y turismo regenerativo. La propuesta aquí desarrollada integra captación de lluvia, módulos hidropónicos, cultivo en sustrato, acuaponía y energía solar. El propósito no es afirmar de antemano que el sistema solucionará las dificultades alimentarias de la isla, sino diseñar una alternativa de pequeña escala que pueda evaluarse técnica, ambiental, social y económicamente.

La Ingeniería Industrial contribuye mediante el análisis de procesos, dimensionamiento de recursos, control de calidad, gestión de inventarios y proveedores, mantenimiento, evaluación de costos e indicadores. Estos elementos permiten pasar de una idea tecnológica a un proyecto organizado, medible y susceptible de mejora continua.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

La propuesta parte de cinco desafíos que deben confirmarse y cuantificarse durante el diagnóstico inicial: (1) dependencia de abastecimiento externo para una parte de los alimentos frescos; (2) disponibilidad limitada y costo del agua dulce; (3) restricciones de espacio y condiciones de suelo para agricultura convencional; (4) costos logísticos y variaciones en disponibilidad y frescura; y (5) oportunidad de ampliar la relación entre turismo y sostenibilidad mediante experiencias participativas.

Un sistema integrado puede contribuir a responder a estos desafíos, pero también introduce riesgos: inversión inicial, necesidad de energía continua para la recirculación, salinidad o contaminación del agua captada, corrosión por ambiente marino, fallas de bombas, control de pH y conductividad eléctrica, enfermedades de plantas o peces, y necesidad de personal capacitado. Por ello, el diseño debe acompañarse de procedimientos de operación, mantenimiento y medición.

1.2 Pregunta de investigación

¿Cómo diseñar y evaluar, desde la Ingeniería Industrial, un sistema integrado agrovoltaico e hidropónico para Ecoculture que optimice el uso del agua y la energía, produzca hortalizas adaptadas a las condiciones de San Andrés y aporte valor educativo y turístico, con viabilidad técnica y económica verificable?

1.3 Sistematización del problema

¿Qué configuración técnica es más apropiada para combinar captación de lluvia, NFT, cultivo en sustrato, acuaponía y energía solar en un piloto de pequeña escala?

¿Qué recursos, materiales, proveedores, rutinas de mantenimiento y controles de calidad se necesitan para operar el sistema?

¿Qué indicadores permiten medir consumo de agua, energía, productividad, costos, calidad y participación turística?

¿Qué riesgos técnicos, ambientales, sanitarios y económicos deben controlarse antes de ampliar el proyecto?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar una propuesta técnica y operativa de un sistema integrado de captación de aguas lluvias, hidroponía, acuaponía y energía solar para Ecoculture en San Andrés Islas, incorporando herramientas de Ingeniería Industrial para optimizar recursos, orientar la producción local y fortalecer la educación ambiental y el turismo regenerativo.

2.2 Objetivos específicos

Caracterizar las necesidades y restricciones del contexto insular relevantes para el diseño del sistema, especialmente agua, energía, clima, abastecimiento y espacio disponible.

Definir una arquitectura modular que integre captación y filtración de lluvia, módulos NFT para cultivos de hoja, cultivo en sustrato con riego por goteo para cultivos de fruto y, si se valida su viabilidad, un módulo acuapónico independiente o integrado.

Estimar materiales, equipos, mano de obra, proveedores y costos iniciales y operativos, distinguiendo las partidas cotizadas de las que requieren verificación.

Establecer procedimientos de operación, mantenimiento preventivo, control de calidad del agua y solución nutritiva, bioseguridad y registro de datos.

Proponer indicadores de desempeño y un plan piloto para comprobar los resultados técnicos, económicos, ambientales y educativos.

Diseñar una actividad concreta de participación comunitaria y turística vinculada al aprendizaje sobre producción sostenible.

3. Justificación

3.1 Justificación ambiental

La recirculación hidropónica y el uso de agua lluvia pueden disminuir la demanda de agua de otras fuentes si el sistema se diseña, opera y mantiene correctamente. La reutilización de materiales aptos, la separación de residuos y el uso de energía solar pueden apoyar la economía circular. Estos beneficios deben verificarse con mediciones; el agua lluvia no se considerará potable sin tratamiento y análisis adecuados.

3.2 Justificación social y alimentaria

La producción de pequeñas cantidades de hortalizas frescas puede diversificar el abastecimiento local, generar conocimientos prácticos y ofrecer oportunidades de participación a residentes, estudiantes y emprendimientos. La contribución a la seguridad alimentaria dependerá de la escala productiva, continuidad, calidad, costos y acceso de la comunidad.

3.3 Justificación económica y turística

La producción local podría reducir parte de la necesidad de transportar determinadas hierbas y hortalizas, aunque no se debe asumir que el costo unitario será inferior sin calcular energía, nutrientes, semillas, reposición, mano de obra, depreciación y transporte

de equipos. La instalación también puede ofrecer recorridos guiados, talleres y experiencias gastronómicas que aporten ingresos complementarios.

3.4 Justificación desde Ingeniería Industrial

El proyecto permite aplicar planeación de capacidad, diseño de procesos, gestión de inventarios, compras, análisis de costos, control de calidad, mantenimiento preventivo, seguridad laboral, indicadores y mejora continua. La disciplina permite evaluar no solo si el sistema funciona, sino si puede operarse de forma confiable, segura y sostenible.

4. Marco referencial

4.1 Contexto territorial

San Andrés forma parte del archipiélago colombiano y del contexto ambiental de la Reserva de Biosfera Seaflower. La planificación debe reconocer la biodiversidad, la cultura raizal, la fragilidad de los ecosistemas y la importancia de que las iniciativas turísticas beneficien a la comunidad local. Antes de construir, se deben revisar los requisitos ambientales, de uso del suelo, manejo de aguas, instalación eléctrica y acuicultura aplicables.

4.2 Fundamentos técnicos

Hidroponía NFT

La técnica de película nutritiva (NFT) hace circular una lámina de solución nutritiva por canales inclinados. Es apropiada principalmente para cultivos de hoja y algunas aromáticas, pero depende de la continuidad del flujo y de la oxigenación de las raíces. Se

recomienda prever alarma de bajo nivel, bomba de respaldo o plan de contingencia y protección eléctrica.

Cultivo en sustrato y riego por goteo

En este sistema las raíces crecen en un medio como fibra de coco y reciben agua con nutrientes mediante goteros. Es más apropiado para cultivos de fruto y plantas que requieren mayor soporte, como tomate, pimentón y berenjena. Deben evaluarse drenaje, salinidad, frecuencia de riego, tutorado y manejo de lixiviados.

Acuaponía

La acuaponía integra la cría de peces con el cultivo vegetal: los residuos de los peces se transforman mediante procesos biológicos en nutrientes aprovechables por las plantas. Requiere control del oxígeno disuelto, temperatura, pH, amonio, nitritos, densidad de peces y biofiltro. No debe asumirse que el agua de lluvia o cualquier agua captada es apta para peces sin pruebas.

Captación de aguas lluvias

El sistema puede incluir canaletas, mallas para hojas, dispositivo de descarte de primeras aguas, filtración y almacenamiento cubierto. La cantidad disponible depende de la precipitación, área efectiva del techo, coeficiente de escorrentía y pérdidas. Debe calcularse la demanda y disponer de una fuente alternativa para periodos secos.

Agrovoltaica y energía solar

La agrovoltaica suele referirse a la coexistencia de producción agrícola y generación fotovoltaica en una misma área. En este proyecto, los paneles pueden ubicarse sobre una cubierta o estructura compatible, siempre que se evalúen sombreado, ventilación, carga

estructural, corrosión y acceso de mantenimiento. La propuesta energética debe dimensionarse a partir del consumo real de bombas, aireadores, sensores y controladores.

Economía circular y turismo regenerativo

La economía circular busca reducir desperdicios y mantener materiales y recursos en uso de manera segura. El turismo regenerativo pretende que las actividades turísticas contribuyan positivamente al territorio y a sus comunidades. Para Ecoculture, el sistema puede convertirse en un espacio de demostración, formación y diálogo con conocimientos locales.

4.3 Ingeniería Industrial y sostenibilidad

Las herramientas aplicables incluyen: diagramas de flujo, análisis de capacidad, estudio de tiempos, inventarios mínimos de repuestos, mantenimiento preventivo, matriz de riesgos, costos de ciclo de vida, indicadores clave de desempeño (KPI) y ciclo PHVA —planear, hacer, verificar y actuar—. La mejora continua se basará en datos reales y no únicamente en estimaciones de diseño.

5. Preguntas críticas para Ecoculture

¿Cómo determinará Ecoculture la capacidad productiva y la demanda real de agua del sistema para demostrar, con una línea base y mediciones periódicas, cuánto recurso hídrico se ahorra frente al método de producción que se tome como comparación?

¿Qué estrategia operativa y de mantenimiento garantizará la continuidad de bombas, aireadores y controles ante cortes eléctricos, fallas de equipos y corrosión por el ambiente marino, sin poner en riesgo los cultivos ni los peces?

¿Qué indicadores económicos, ambientales y sociales se utilizarán para comprobar que el sistema es viable, beneficia a proveedores y comunidad local, y genera valor educativo o turístico sin trasladar costos excesivos a la operación?

6. Metodología

6.1 Enfoque y tipo de investigación

Se propone una investigación aplicada, descriptiva y de diseño tecnológico, con enfoque mixto. La fase cuantitativa abarcará mediciones de agua, energía, producción, costos, fallas y rendimiento. La fase cualitativa incluirá entrevistas semiestructuradas con responsables de Ecoculture, proveedores, productores, actores turísticos y miembros de la comunidad.

6.2 Fases

Fase	**Actividades**	**Producto verificable**
1. Diagnóstico	Revisar necesidades, espacio, demanda, clima, disponibilidad de agua y energía; entrevistar actores.	Diagnóstico y requisitos del piloto.
2. Diseño	Definir módulos, diagramas, dimensiones, flujo de agua, ubicación solar, materiales y controles.	Planos preliminares, lista de materiales y diagrama de proceso.
3. Presupuesto y compras	Solicitar cotizaciones locales y nacionales;	Presupuesto actualizado y matriz de proveedores.

	comparar calidad, disponibilidad, garantía y transporte.	
4. Construcción y puesta en marcha	Instalar estructura, captación, filtración, tuberías, módulos, equipos y sensores; realizar pruebas sin cultivo.	Acta de pruebas, lista de chequeo y protocolos.
5. Piloto y monitoreo	Registrar diariamente agua, pH, EC, temperatura, energía, crecimiento, incidencias y cosecha.	Base de datos y tablero de indicadores.
6. Evaluación	Comparar datos con línea base, revisar costos, entrevistar participantes y proponer ajustes.	Informe de resultados y plan de mejora.

6.3 Técnicas e instrumentos

Lista de chequeo para inspección de infraestructura, seguridad y mantenimiento.

Medidores calibrados de pH, conductividad eléctrica y temperatura; medidor de caudal o registro volumétrico.

Medidor de energía o registro de potencia y horas de operación.

Formatos de siembra, mortalidad, cosecha, consumo de insumos, fallas y costos.

Entrevistas a actores clave y encuesta corta de satisfacción de participantes turísticos.

6.4 Alcance y limitaciones

Este documento presenta un diseño preliminar y un presupuesto base suministrado como insumo de trabajo. No sustituye estudios estructurales, eléctricos, hidráulicos, sanitarios o ambientales. Los precios deben confirmarse; la productividad depende de variedad, clima, calidad del agua, nutrición, manejo y plagas. Los resultados de ahorro y rentabilidad solo podrán concluirse después de operar el piloto durante un periodo representativo.

7. Propuesta técnica del sistema

7.1 Arquitectura funcional

El flujo propuesto es: techo/cubierta → canaletas y malla → descarte inicial de lluvia → filtro y tanque de almacenamiento → tratamiento y verificación de calidad → distribución a los módulos que correspondan. En paralelo, los paneles solares, controlador, batería e inversor suministran energía a bombas, sensores y equipos, según un diseño eléctrico seguro. Los retornos hidropónicos deben dirigirse al tanque del circuito correspondiente; el circuito acuapónico debe diseñarse y controlarse para no mezclar soluciones incompatibles.

Se recomienda separar conceptualmente tres circuitos: (1) agua lluvia almacenada; (2) solución nutritiva NFT/sustrato; y (3) agua de peces/biofiltro acuapónico. La integración debe realizarse solo donde los parámetros de calidad y nutrición sean compatibles. La solución de hidroponía convencional no debe devolverse a los peces sin evaluación técnica.

7.2 Diseño y dimensiones preliminares

Elemento	**Parámetro preliminar**	**Observación de ingeniería**
Estructura base	4,0 m largo × 2,5 m ancho; 10 m² aproximados	Verificar cargas de viento, peso de paneles, corrosión y anclajes.
Altura de estructura	2,2 m parte baja y 2,8 m parte alta	Validar accesibilidad y estabilidad estructural.
Pendiente de cubierta	15–20°	Definir según cubierta, lluvia, viento y recomendación del fabricante.
Canaletas de lluvia	Aproximadamente 6 m; bajantes PVC 3 pulgadas, 4 m	Ajustar a geometría real del techo.
NFT	8 tubos de PVC de 3 pulgadas, 3,5 m cada uno; 28 m totales	El diseño original estima 4 niveles × 2 tubos; comprobar carga y pendiente.
Distancia entre plantas NFT	25 cm en diseño base; 14 plantas por tubo, 112 en total	Para lechuga y cilantro puede requerirse otro espaciamiento; ajustar por cultivo.
Tanques propuestos	500 L, 300 L, 500 L y 200 L = 1.500 L	Las capacidades deben aclararse por función; no

		son equivalentes al tanque de 4.000 L citado en el manual.
Filtración	Tanque filtro aproximado de 120 L, grava, arena, carbón y esponja	Validar medios y caudal; carbón no reemplaza desinfección ni análisis.
Bombas	Principal 3.000 L/h y bomba pecera 1.000 L/h	Seleccionar por altura dinámica, pérdidas y caudal requerido, no solo por caudal nominal.
Fotovoltaico	Referencia de 900 W de paneles	Dimensionar con consumo real, horas solares, pérdidas y autonomía.
Baterías	Dos baterías 12 V, 200 Ah cada una, según propuesta	Energía nominal conjunta 4,8 kWh a 12 V por batería en paralelo; la energía útil depende de conexión, química y profundidad de descarga.

Nota técnica: las dimensiones y capacidades anteriores son referencias preliminares del material de partida, no planos constructivos aprobados. El sistema contiene dos configuraciones distintas en los insumos: un prototipo de aproximadamente 1.500 L de almacenamiento y un manual que menciona tanque de 4.000 L. Antes de comprar, se debe seleccionar una sola configuración y recalcular caudales, nutrientes, costos y consumos.

7.3 Selección de cultivos

Cultivo	**Sistema sugerido**	**Ciclo orientativo indicado en el material**	**Criterios y precauciones**
Lechuga	NFT	30–40 días	Prioridad para piloto; evaluar variedades tolerantes al calor y malla sombra.
Cilantro	NFT o canal adaptado	30–40 días	Controlar floración prematura por calor y espaciamiento.
Cebollín	NFT	45–60 días	Permite cortes sucesivos según manejo.
Albahaca	NFT	40–50 días	Cosecha escalonada; controlar pH y ventilación.
Tomate cherry	Sustrato + goteo	75–90 días a primera cosecha, según variedad	Tutorado, poda, polinización y protección de lluvia.
Tomate chonto	Sustrato + goteo	90–120 días, según variedad	Mayor demanda de soporte y control nutricional.

Pimentón	Sustrato + goteo	80–110 días, según variedad	Validar adaptación y manejo de humedad.
Berenjena	Sustrato + goteo	90–110 días, según variedad	Requiere espacio, soporte y manejo fitosanitario.
Ají	Sustrato + goteo	70 días o más, según variedad	Potencial gastronómico; confirmar variedad local.

Los ciclos son rangos orientativos y deben confirmarse con la variedad y las condiciones reales. Para la fase inicial se recomienda priorizar lechuga, cilantro, cebollín y albahaca por la rapidez de evaluación, y añadir cultivos de fruto una vez estabilizados los controles del sistema.

7.4 Operación y mantenimiento

Frecuencia	**Actividad**	**Registro**
Diaria	Verificar caudal, nivel de tanques, fugas, funcionamiento de bombas, pH, EC y temperatura; revisar plantas y peces si aplica.	Lista diaria de operación.

Semanal	Limpiar filtros según necesidad, revisar raíces, goteros, soportes, estructura y conexiones eléctricas visibles; revisar plagas.	Lista semanal y novedades.
Quincenal o según mediciones	Evaluar renovación o ajuste de solución nutritiva; no cambiar automáticamente sin verificar calidad y requerimientos.	Consumo de nutrientes y parámetros.
Mensual	Calibrar instrumentos, revisar batería y conexiones, medir consumo de energía y actualizar inventarios.	Informe mensual de mantenimiento.
Semestral/anual	Revisar corrosión, estructura, cubierta, bombas y baterías conforme a manuales y condiciones de garantía.	Plan preventivo actualizado.

No se recomienda cambiar toda la solución nutritiva de manera automática cada 15 días sin considerar volumen, cultivo y mediciones. La reposición y renovación deben seguir un

protocolo técnico y gestionar correctamente los efluentes, evitando descargas contaminantes al ambiente.

7.5 Integración turística y educativa

Recorrido guiado que explique captación de lluvia, recirculación, cultivos y energía solar.

Taller práctico de siembra y trasplante para estudiantes, familias y visitantes.

Jornada de cosecha y cocina demostrativa con hierbas y hortalizas locales, coordinada con actores comunitarios.

Panel de datos visible con litros de agua usados, cosecha obtenida, energía consumida y participantes formados.

Vinculación de proveedores, guías, agricultores y portadores de saberes locales, con remuneración y reconocimiento acordados.

8. Gestión de proveedores y abastecimiento

Los proveedores mencionados en la información preliminar constituyen contactos por verificar, no cotizaciones confirmadas. Se recomienda confirmar existencia, dirección, teléfono, inventario, precio, garantía, transporte y compatibilidad técnica antes de realizar compras.

Proveedor/contacto por verificar	**Materiales o apoyo potencial**	**Acción de validación**
Ferretería Dany Mar, San Luis–Jean Pont	PVC, tornillería, pegantes y herramientas	Solicitar cotización por diámetro, presión, longitud y ficha técnica.

Almacenes JR Duarte Blum II, avenida Duarte Blum	Plásticos, insumos generales y materiales para prototipos	Confirmar inventario, calidad UV y disponibilidad de entrega.
SOPESA / Planta Solar Sopesa	Orientación o componentes de energía solar	Consultar dimensionamiento, instalación, garantías y seguridad eléctrica.
Carpinterías y talleres locales	Retazos de madera, soportes y materiales recuperables	Verificar tratamiento, resistencia, higiene y aptitud para uso exterior.
Centros de reciclaje locales	Materiales recuperables aptos para usos no críticos	Inspeccionar limpieza, trazabilidad y seguridad; evitar materiales que contaminen el agua o los alimentos.

Criterios sugeridos para seleccionar proveedores: calidad y cumplimiento técnico (30 %), costo total puesto en la isla (25 %), disponibilidad y plazo (20 %), garantía y soporte (15 %), y criterios ambientales o de economía circular (10 %). Los porcentajes son una propuesta inicial y pueden ajustarse con Ecoculture.

9. Presupuesto preliminar

La estimación inicial suministrada para varios componentes del prototipo suma COP $6.157.000. Este valor no debe interpretarse como costo total de instalación llave en mano: en la tabla de origen no aparecen todos los elementos del sistema solar, baterías, inversor,

controlador, instalación, mano de obra, transporte, permisos, análisis de agua, elementos de seguridad ni contingencia.

Componente	**Subtotal estimado (COP)**
Sistema hidropónico NFT	$1.512.000
Tanques	$960.000
Sistema de filtración	$650.000
Tuberías y accesorios	$670.000
Bombas	$430.000
Estructura y cubierta	$1.470.000
Instrumentos y otros	$465.000
TOTAL PARCIAL DEL DISEÑO BASE	$6.157.000

Costos operativos anuales indicados en el manual: utensilios y equipos COP $350.000–$420.000; germinación y semillas COP $1.126.000; nutrientes y control COP $650.000–$800.000; sustrato y goteo COP $380.000–$460.000; limpieza y mantenimiento COP $65.000–$75.000. Total de referencia: COP $2.571.000–$2.881.000 por 12 meses. Debe revisarse porque hay diferencias entre las cantidades de nutrientes, volúmenes de tanque y periodicidad de renovación mencionadas en distintas secciones.

Para elaborar un presupuesto de inversión completo se deben añadir cotizaciones actuales para paneles solares, baterías, inversor, controlador MPPT, protecciones eléctricas, cableado, instalación, mano de obra, transporte a la isla, repuestos, análisis de calidad de agua, elementos de seguridad, contingencia y costos administrativos. Se recomienda

reservar una contingencia definida tras recibir cotizaciones, sin fijar un porcentaje definitivo antes de conocer el alcance.

9.1 Evaluación económica propuesta

Para estimar viabilidad, se debe calcular el costo unitario por kilogramo: costos operativos atribuibles del periodo divididos entre kilogramos comercializables. También deben estimarse el porcentaje de merma, ahorro potencial frente a compra externa, ingresos por talleres y recorridos, mantenimiento, depreciación y costo de oportunidad del espacio. No es posible afirmar rentabilidad sin datos de producción, precios de venta, demanda, energía y mano de obra.

10. Indicadores de desempeño

Dimensión	**Indicador**	**Fórmula o método**	**Frecuencia**
Agua	Consumo de agua externa (L/mes)	Lectura de medidor o volumen agregado	Semanal/mensual
Agua	Ahorro relativo de agua (%)	(Consumo base comparable − consumo piloto) / consumo base × 100	Mensual, con línea base definida
Energía	Consumo eléctrico (kWh/mes)	Medidor de energía o cálculo validado	Mensual

		de potencia × tiempo	
Producción	Rendimiento (kg/m²/ciclo)	Kilogramos comercializables / área de cultivo	Por cosecha
Producción	Porcentaje de merma (%)	Kg no comercializables / kg cosechados × 100	Por cosecha
Calidad	Cumplimiento de pH y EC (%)	Lecturas dentro del rango objetivo / total de lecturas × 100	Semanal/mensual
Operación	Disponibilidad del sistema (%)	Horas disponibles / horas planificadas × 100	Mensual
Mantenimiento	Número y duración de fallas	Registro de incidentes y tiempo fuera de servicio	Mensual
Economía	Costo por kg (COP/kg)	Costos atribuibles / kg comercializables	Por ciclo
Comunidad/turismo	Participantes formados	Conteo de asistentes y actividades	Mensual
Satisfacción	Satisfacción de participantes (%)	Respuestas favorables /	Por actividad

		respuestas válidas × 100	
Abastecimiento local	Porcentaje de compras locales (%)	Valor de compras locales / valor total de compras × 100	Trimestral

La meta preliminar de reducir al menos 60 % el uso de agua, planteada en el material base, debe tratarse como hipótesis de desempeño, no como resultado garantizado. La comparación requiere definir un sistema de referencia equivalente, medir volúmenes y documentar condiciones.

11. Riesgos y medidas de control

Riesgo	**Efecto potencial**	**Medida de control**
Falta de agua lluvia en periodos secos	Interrupción de riego	Balance hídrico, tanque adecuado, fuente de respaldo y protocolo de priorización.
Salinidad o contaminación del agua	Daño a plantas, peces o calidad del producto	Análisis de agua, filtración y tratamiento definidos por resultados; separar usos.
Corte eléctrico o falla de bomba	Pérdida de flujo, oxígeno y cultivos	Alarma, bomba de respaldo, energía de emergencia y plan de respuesta.

Corrosión por ambiente marino	Fallas estructurales y eléctricas	Materiales aptos, recubrimientos, inspección y mantenimiento preventivo.
Temperatura y humedad elevadas	Estrés térmico, enfermedades y caída de rendimiento	Malla sombra ajustada, ventilación, monitoreo y selección varietal.
Desequilibrio de nutrientes o pH	Deficiencias, toxicidad y bajo rendimiento	Medidores calibrados, bitácora y dosificación según ficha técnica.
Problemas sanitarios en acuaponía	Mortalidad de peces y riesgo de contaminación	Bioseguridad, monitoreo de parámetros, cuarentena y asesoría acuícola.
Sobrecostos y baja demanda	Pérdida de viabilidad económica	Cotizaciones, piloto escalonado, análisis de costo unitario y validación de mercado.
Daño por viento o lluvia intensa	Riesgo de seguridad y pérdida de equipos	Cálculo estructural, anclajes, drenaje y cumplimiento de normas aplicables.

12. Plan de implementación

Etapa	**Duración orientativa**	**Entregable/criterio de salida**
Diagnóstico y acuerdos comunitarios	2–4 semanas	Requisitos, espacio, actores, permisos por consultar y línea base.
Diseño detallado y cotizaciones	3–5 semanas	Planos revisados, balance hídrico/energético y presupuesto validado.
Compras y construcción	4–8 semanas	Sistema instalado, pruebas hidráulicas y eléctricas aprobadas.
Estabilización y siembra piloto	2–4 semanas	Parámetros estables y procedimientos operativos aplicados.
Monitoreo de cultivos y evaluación	3–6 meses como mínimo, según cultivo	Registros de producción, consumo, fallas, costos y participación.
Revisión y decisión de escalamiento	2–3 semanas	Informe de resultados, ajustes y decisión documentada.

Los plazos son orientativos y dependen de permisos, transporte, disponibilidad de materiales, clima y capacidad del equipo. El escalamiento debe condicionarse a datos del piloto, no solo al cumplimiento del calendario.

13. Acción concreta de participación desde Ingeniería Industrial

La acción propuesta es diseñar e implementar un tablero de control operativo para el piloto de Ecoculture, acompañado de formatos de registro y un ciclo mensual de mejora continua.

Actividades concretas:

Levantar el mapa del proceso desde la captación del agua hasta la cosecha y la experiencia educativa.

Crear una hoja de cálculo con registros diarios de agua, pH, EC, temperatura, energía, siembra, cosecha, mermas, fallas e insumos.

Definir responsables, frecuencias de medición y límites de alerta junto con el equipo técnico.

Preparar un inventario mínimo de repuestos críticos y un calendario de mantenimiento preventivo.

Presentar un reporte mensual con tres problemas prioritarios y acciones de mejora verificables.

Este aporte es concreto, medible y propio de Ingeniería Industrial, ya que conecta la operación diaria con la gestión de recursos, los costos y la toma de decisiones.

14. Resultados esperados y discusión

Se espera obtener un diseño modular, una lista de materiales verificable, un presupuesto actualizado, procedimientos de operación y mantenimiento, un tablero de indicadores y una experiencia educativa que permita comunicar prácticas de sostenibilidad. También se

espera identificar qué cultivos ofrecen mejor desempeño en el microclima y cuáles son sus costos reales por kilogramo.

La posible reducción del consumo de agua, la producción local, la disminución de compras externas y los ingresos turísticos son beneficios potenciales, no resultados medidos. La discusión deberá contrastar los datos reales del piloto con la línea base, considerar pérdidas y costos completos, y documentar limitaciones. Si el sistema requiere más energía, nutrientes o mano de obra de la prevista, el diseño debe ajustarse antes de replicarse.

Un aspecto crítico es la coherencia entre el prototipo de 1.500 L descrito en el diseño de materiales y el tanque de 4.000 L que aparece en el manual. También deben reconciliarse las cantidades de plantas: el sistema base de ocho tubos contempla 112 posiciones, mientras que el módulo del manual distribuye 36 plantas en tres módulos. Estas alternativas corresponden a escalas distintas y no deben presupuestarse o construirse como si fueran una única configuración.

15. Conclusiones proyectadas

La propuesta integrada tiene potencial para funcionar como un piloto de producción sostenible y aula viva, siempre que se dimensione según la disponibilidad de agua, energía, espacio y capacidades de mantenimiento.

La Ingeniería Industrial aporta herramientas para convertir el diseño técnico en un proceso medible mediante costos, indicadores, inventarios, control de calidad y mantenimiento.

Los valores de inversión y operación presentados son preliminares; no incluyen todos los componentes y requieren cotizaciones actualizadas, especialmente para la parte fotovoltaica, la instalación y el transporte.

La elección de cultivos debe priorizar especies de ciclo corto para la fase inicial y validar variedades adaptadas al calor, humedad, lluvia y salinidad ambiental.

Las metas de ahorro de agua y productividad solo podrán comprobarse con un piloto, una línea base comparable y registros consistentes.

La participación comunitaria y la integración turística deben diseñarse con actores locales, procurando beneficios transparentes y respeto por la cultura y el entorno de San Andrés.

16. Recomendaciones

Elegir y congelar una única configuración del piloto antes de comprar: 36 plantas, 112 posiciones NFT u otra capacidad claramente definida.

Realizar un balance hídrico y energético con datos locales, demanda de los cultivos, precipitación, área de captación y consumo real de equipos.

Solicitar asesoría técnica para estructura, instalación eléctrica y sistema acuapónico; verificar permisos y requisitos aplicables.

Analizar la calidad del agua captada y definir tratamientos con base en resultados de laboratorio.

Empezar con cultivos de hoja y aromáticas; incorporar cultivos de fruto y peces por etapas una vez estabilizado el sistema.

Separar los circuitos de agua y solución nutritiva cuando sea necesario para evitar incompatibilidades entre hidroponía y acuaponía.

Validar proveedores, precios, garantías y costos de transporte a San Andrés; conservar al menos dos alternativas para componentes críticos.

Usar un registro diario y revisar indicadores mensualmente para decidir mejoras y escalamiento.

Definir protocolos de higiene, inocuidad alimentaria, manejo de nutrientes, residuos y seguridad laboral.

Documentar los saberes y aportes de la comunidad local, y evaluar la experiencia turística con indicadores de participación y satisfacción.

Referencias y fuentes por verificar

Nota académica: el texto de partida no incluye referencias bibliográficas completas ni datos de medición primaria. Antes de entregar la tesis, se deben incorporar fuentes verificadas y citadas según el formato exigido por la institución (por ejemplo, APA 7). Se recomienda consultar:

Documentación oficial de la Reserva de Biosfera Seaflower y de las autoridades ambientales competentes sobre biodiversidad y manejo del territorio.

Guías técnicas universitarias o institucionales sobre hidroponía NFT, cultivo en sustrato, acuaponía, calidad de agua y manejo de peces.

Fuentes oficiales y técnicas sobre captación de aguas lluvias, balances hídricos y tratamiento de agua.

Normativa colombiana vigente sobre uso del suelo, vertimientos, calidad e inocuidad de alimentos, instalaciones eléctricas y seguridad y salud en el trabajo.

Fichas técnicas de fabricantes para bombas, paneles solares, baterías, controladores, tuberías, filtros y medidores.

Entrevistas, cotizaciones, resultados de laboratorio y registros del piloto de Ecoculture, identificados con fecha y responsable.

No se deben citar como hechos comprobados las direcciones, teléfonos, precios, ciclos de cultivo ni porcentajes de ahorro del material preliminar hasta validarlos con sus fuentes.

Anexo A. Lista de chequeo previa a la construcción

☐ Configuración final y capacidad del piloto definidas.

☐ Ubicación, drenaje, anclajes y cargas estructurales revisados por personal competente.

☐ Calidad del agua lluvia analizada y tratamiento definido.

☐ Balance de captación y demanda de agua documentado.

☐ Cálculo de consumo energético y autonomía de respaldo completado.

☐ Equipos, protecciones eléctricas y puesta a tierra definidos por técnico competente.

☐ Circuitos hidropónico y acuapónico separados o integrados con justificación técnica.

☐ Materiales aptos para contacto con agua y alimentos confirmados.

☐ Proveedores, garantías, transporte y costos cotizados.

☐ Plan de operación, mantenimiento, bioseguridad y emergencia aprobado.

Anexo B. Formato básico de registro diario

Fecha	**pH**	**EC (mS/cm)**	**Temp. agua (°C)**	**Agua añadida (L)**	**Energía (kWh)**	**Cultivo/etapa**	**Incidencias/acciones**

Anexo C. Formato de cosecha y costos

Fecha	Cultivo	Plantas cosechadas	Kg cosechados	Kg comercializables	Merma (kg)	Insumos (COP)	Observaciones