

BASE TÉCNICA INTEGRAL

RENACIMIENTO GANADERO MAYA

Macroproyecto Estratégico 2026-2030



Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
Oficina de Representación en la Entidad Federativa Yucatán (OREF)
Programa Federal Concurrente - Esquema Tripartito

Inversión Total: \$1,087.9 millones de pesos MXN

Esquema Híbrido: Subsidio Tripartito + Crédito Productivo

Compilación Técnica Integral

Sistemas Silvopastoriles • Repoblamiento Bovino • Desarrollo Lechero
Mejoramiento Genético • Análisis Territorial • Modelos Económicos

Elaborado por:

MVZ Sergio Muñoz de Alba Medrano
Prestador de Servicios Independiente
Oficina de Representación en la Entidad Federativa Yucatán (OREF)
Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

Diciembre 2025

Índice

1. Resumen Ejecutivo

La presente **Base Técnica Integral** consolida los fundamentos científicos, metodologías técnicas, memorias de cálculo y modelos económicos del Macroproyecto Estratégico “Renacimiento Ganadero Maya 2026-2030”. Este documento integra siete análisis técnicos especializados en un marco coherente que sustenta la inversión de **\$1,087.9 millones de pesos** distribuida en seis componentes estratégicos interconectados en el marco de la reconversión territorial sustentable del sector pecuario yucateco.

En el contexto de la transformación del sector agropecuario mexicano hacia la sustentabilidad y competitividad internacional, el Estado de Yucatán presenta una oportunidad excepcional para demostrar que la ganadería tropical puede ser productiva, rentable y ambientalmente responsable. Los datos oficiales del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) confirman que la entidad cuenta con 605,536 cabezas bovinas distribuidas en 1,517,089 hectáreas de superficie ganadera, lo que representa un potencial subutilizado que puede maximizarse mediante la implementación coordinada de tecnologías probadas y marcos normativos internacionales.

1.1. Síntesis de Componentes Técnicos

2. Antecedentes y Justificación Estratégica

2.1. Contexto Histórico de la Ganadería Yucateca

El sector ganadero de Yucatán ha experimentado transformaciones significativas en las últimas décadas, caracterizadas por la transición de un modelo extensivo tradicional hacia sistemas productivos que demandan mayor tecnificación y sustentabilidad ambiental. La península de Yucatán, con sus características edafoclimáticas particulares y su posición geográfica estratégica en el marco del Tratado México-Estados Unidos-Canadá (T-MEC), representa un escenario privilegiado para el desarrollo de la ganadería tropical moderna.

2.1.1. Evolución del Inventario Ganadero: Análisis de Series Temporales SIAP 2014-2023

El análisis de los datos oficiales del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) documenta patrones evolutivos contrastantes entre los diferentes subsectores de la ganadería bovina yucateca. El análisis de series temporales para el período 2014-2023 documenta tanto oportunidades como desafíos estructurales que justifican la implementación del presente macroproyecto.

Subsector Ganadero	2014	2023	Variación Absoluta	Variación Relativa
Bovinos para carne	553,509	602,180	+48,671	+8.8 %
Bovinos para leche	5,220	3,356	-1,864	-35.7 %
Inventario Total	558,729	605,536	+46,807	+8.4 %

Tabla 1: Evolución del Inventario Ganadero Yucateco según Datos Oficiales SIAP

Interpretación diagnóstica: El crecimiento moderado del inventario de ganado de carne (+8.8 % en nueve años) contrasta dramáticamente con la contracción del sector lechero (-35.7 %), evidenciando una especialización productiva desequilibrada que limita las oportunidades de diversificación e integración vertical del sector. Esta asimetría sectorial constituye un factor crítico que justifica la implementación de componentes específicos de desarrollo lechero tropical dentro del marco integral del macroproyecto.

2.1.2. Caracterización Territorial: Aplicación del Principio de Pareto

El análisis territorial basado en el Padrón Ganadero Nacional 2025 y la aplicación rigurosa del Principio de Pareto revela una concentración geoespacial extraordinaria de la actividad ganadera yucateca. La identificación de 11 municipios prioritarios que concentran el 80.3 % de la actividad pecuaria estatal en únicamente el 10.4 % del territorio municipal constituye el fundamento técnico para la focalización estratégica de recursos del macroproyecto.

Ranking	Municipio Pareto	Organización	Superficie (ha)	UPP	% Acumulado
1	Tizimín	UGROY	260,595	2,183	35.2 %
2	Panabá	UGROY	100,026	539	48.1 %
3	Tekax	UGRY	78,245	343	54.3 %
4	Buctzotz	UGROY	74,793	492	59.6 %
5	Dzilam González	UGROY	55,102	248	63.5 %
6	Tzucacab	UGRY	50,688	411	67.0 %
7	Cenotillo	UGROY	43,279	294	70.0 %
8	Peto	UGRY	41,168	212	72.8 %
9	Sucilá	UGROY	39,712	276	75.6 %
10	Izamal	UGRY	33,903	319	78.0 %
11	San Felipe	UGROY	33,203	144	80.3 %
Total 11 Municipios Pareto		Mixto	810,714	5,461	80.3 %

Tabla 2: Concentración Territorial según Principio de Pareto - Base para Focalización Estratégica

Implicaciones para la planificación estratégica: La aplicación del Principio de Pareto permite optimizar la asignación de recursos mediante la concentración del 80 % de la inversión en los 11 municipios que concentran el 80.3 % de la actividad ganadera estatal. Esta metodología de focalización territorial maximiza el impacto económico, social y ambiental del macroproyecto, garantizando economías de escala y sinergia intercomponente.

2.2. Marco Normativo e Institucional

2.2.1. Tratado México-Estados Unidos-Canadá (T-MEC): Oportunidades Comerciales

La implementación del T-MEC establece un marco comercial preferencial que posiciona estratégicamente a Yucatán para el acceso a mercados de exportación de productos ganaderos de alto valor. Los protocolos sanitarios binacionales México-Estados Unidos, particularmente en materia de certificación de tuberculosis bovina y erradicación del Gusano Barrenador del Ganado (GBG), constituyen requisitos habilitadores para la exportación que justifican los componentes específicos del macroproyecto.

Las oportunidades comerciales identificadas incluyen:

- **Exportación de ganado en pie:** Certificación sanitaria TBC permite acceso directo a mercado estadounidense
- **Productos lácteos especializados:** Nichos de mercado para productos tropicales diferenciados
- **Material genético:** Comercialización de semen y embriones certificados bajo estándares internacionales
- **Servicios ambientales:** Comercialización de bonos de carbono por captura en sistemas silvopastoriles

2.2.2. Ley de Desarrollo Rural Sustentable: Inclusión y Equidad

En cumplimiento con los mandatos de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable, el macroproyecto incorpora criterios específicos de inclusión social que garantizan la participación equitativa de comunidades mayas, mujeres productoras y jóvenes rurales. Los datos del Padrón Ganadero Nacional confirman que el 35.2 % de las Unidades de Producción Pequeña (UPP) en los municipios Pareto están dirigidas por mujeres, lo que representa una base sólida para la implementación de programas de inclusión de género.

Los mecanismos de inclusión establecidos comprenden:

- **Cuota de participación femenina:** Mínimo 35 % de beneficiarias en todos los componentes
- **Pertinencia cultural maya:** Incorporación de conocimientos tradicionales en manejo silvopastoril
- **Capacitación especializada:** Programas de formación técnica en idioma maya
- **Financiamiento diferenciado:** Esquemas crediticios preferenciales para pequeños productores

2.3. Diagnóstico Técnico de la Problemática Sectorial

2.3.1. Carga Animal y Productividad: Análisis Cuantitativo

El cálculo técnico de la carga animal, basado en metodologías estandarizadas de la FAO y datos oficiales SIAP-SADER, documenta el potencial productivo de los recursos forrajeros yucatecos. Los parámetros técnicos calculados demuestran las oportunidades de mejora alcanzables mediante la implementación de sistemas silvopastoriles intensivos.

Memoria de cálculo de carga animal actual:

- **Inventario bovino validado (SIAP 2023):** 605,536 cabezas
- **Conversión a Unidades Animal (Factor 0.71 UA/cabeza):** 429,930 UA
- **Superficie ganadera registrada:** 1,517,089 hectáreas
- **Carga animal promedio actual:** 0.28 UA/hectárea
- **Potencial con SSPi:** 3.5-4.0 UA/hectárea (+1,167 % incremento)

Oportunidad de mejora productiva: La carga animal tradicional (0.28 UA/ha) representa el punto de partida para alcanzar el potencial de sistemas silvopastoriles intensivos (3.5-4.0 UA/ha), con oportunidades de mejora productiva superior al 1,000 % que justifican técnica y económicamente la inversión propuesta.

2.4. Marco Regulatorio y Presupuestal Federal Ampliado

2.4.1. Presupuesto de Egresos de la Federación 2026 - Ganadería Sustentable

El Presupuesto de Egresos de la Federación 2026 para el Ramo 08 SADER establece una asignación total de **\$109,456 millones de pesos** (+5.2 % real vs 2025), con recursos específicamente etiquetados para ganadería sustentable que alcanzan aproximadamente \$18,500 MDP (16.9 % del ramo total), distribuidos estratégicamente para maximizar el impacto del desarrollo rural.

Programa Presupuestario	Asignación	Modalidad	Mecanismo de
	2026 (MDP)		Concurrencia
S304 - Fomento Agropecuario	\$12,000	Subsidio directo	Convenios específicos
Componente ganadería sustentable	\$4,500	Subsidio concurrente	Estado 25 % mínimo
Bienestar Pequeños y Medianos Ganaderos	\$6,500	Subsidio focalizado	Coordinación estatal
Crédito Ganadero a la Palabra	\$2,000	Microcrédito	Ventanillas estatales
Subtotal Concurrencia	\$13,000	—	Tripartito
SINIIGA/SINIDA (Trazabilidad)	\$3,500	Operación directa	Combate abigeato
Plan Binacional TB México-EE.UU.	\$2,000	Cooperación técnica	APHIS-USDA
TOTAL ETIQUETADO	\$18,500	—	PEC Anexo 11

Tabla 3: Recursos Federales PEF 2026 - Ganadería Sustentable y T-MEC

Programa Especial Concurrente (PEC) - Anexo 11: El mecanismo fundamental para la operación del macroproyecto se establece a través del Programa Especial Concurrente para el Desarrollo Rural Sustentable, que permite la conjunción de recursos federales, estatales y de productores bajo esquemas de coordinación intergubernamental definidos constitucionalmente.

2.4.2. Protocolos Binacionales APHIS-USDA: Certificación Sanitaria

La cooperación técnica México-Estados Unidos en materia de sanidad animal, establecida en el marco del T-MEC, define protocolos específicos que habilitan el acceso preferencial a mercados norteamericanos mediante certificaciones digitales validadas bilateralmente.

Protocolo de Certificación Digitalizada de Tuberculosis Bovina:

- **Plataforma CESO:** Certificación Sanitaria Online con validación APHIS-USDA
- **Trazabilidad individual:** Cada animal cuenta con código único SINIIGA verificable
- **Protocolos de muestreo:** Metodología estadística validada bilateralmente
- **Certificación de predios:** Estatus sanitario reconocido para exportación directa
- **Auditorías conjuntas:** Supervisión técnica SENASICA-APHIS con reconocimiento mutuo

Beneficios comerciales del estatus sanitario certificado:

- **Acceso directo:** Exportación de ganado en pie sin cuarentenas prolongadas
- **Precios premium:** +15-25 % sobre precio nacional por certificación internacional
- **Volumenes preferenciales:** Cuotas de exportación ampliadas bajo T-MEC
- **Productos lácteos:** Habilitación para exportación de productos procesados
- **Material genético:** Comercialización internacional de semen y embriones certificados

2.4.3. Alineación con Política Nacional de Mitigación Climática

El Acuerdo de París y la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de México establecen metas específicas de reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector agropecuario: 30% de reducción para 2030 respecto a la línea base 2013, con trayectoria hacia carbono neutralidad 2050.

Compromiso Nacional	Meta 2030	Contribución Yucatán	Verificación MRV
Reducción emisiones GEI	-30% sector agro	765,000 ton CO ₂ eq	Plataforma digital
Carbono neutralidad	Trayectoria 2050	SSPi + reforestación	Sensores remotos
Objetivos Desarrollo Sostenible	ODS 2, 13, 15	Producción sustentable	Indicadores SIAP
Finanzas verdes	Bonos soberanos	Captura certificada	Estándares internac.

Tabla 4: Alineación del Macroproyecto con Política Nacional de Cambio Climático

Mecanismo de Reporte, Medición y Verificación (MRV): La plataforma digital desarrollada incluye módulos de monitoreo de captura de carbono basados en metodologías del IPCC y estándares internacionales (VCS, Gold Standard) que permiten la certificación de servicios ambientales comercializables en mercados voluntarios de carbono.

2.5. Síntesis de Componentes Técnicos

Componente	Inversión (MDP)	Área/Unidades	Base Técnica
Sistemas Silvopastoriles	\$345.1	6,000 ha	Paquete \$57,523/ha validado
Repoblamiento Bovino	\$150.1	12,000 vaquillas	Modelo becerros 4.0:1
Mejoramiento Genético	\$150.0	120,000 dosis/año	Centro Tizimín certificado
Desarrollo Lechero	\$89.5	75 UPP	SSP lecheros +40%
Mosca Estéril (GBG)	\$300.0	250M moscas/semana	Irradiación Co-60
Certificación TBC	\$51.5	Digitalización total	Plataforma CESO
Gastos Operación	\$16.9	5 técnicos	Equipo OREF optimizado
TOTAL	\$1,087.9	Mix	Base integrada

Tabla 5: Síntesis de Componentes del Macroproyecto

2.6. Principios Rectores de la Integración Técnica

1. **Rigor Científico:** Todos los parámetros técnicos están validados por INIFAP, UADY, y organismos internacionales
2. **Coherencia Territorial:** Focalización Pareto en 11 municipios (80.3 % concentración ganadera)
3. **Viabilidad Económica:** Modelos financieros con ratios 4.0:1 de capacidad de pago crediticio
4. **Sostenibilidad Ambiental:** 765,000 ton CO₂eq capturadas mediante SSPi científicamente diseñados
5. **Integración Sistémica:** Sinergia entre componentes maximiza eficiencia de recursos públicos

3. Marco Territorial y Diagnóstico Ganadero

3.1. Análisis Territorial Basado en Organizaciones Ganaderas Oficiales

3.1.1. Marco Regulatorio: Regionalización Ganadera de Yucatán

Según el Acuerdo de Regionalización publicado en el Diario Oficial de la Federación, el Estado de Yucatán se divide en **dos regiones ganaderas oficiales** con jurisdicciones claramente delimitadas que constituyen la base institucional para la coordinación del macroproyecto:

UGROY - Unión Ganadera Regional del Oriente de Yucatán: Comprende 24 municipios incluyendo Buctzotz, Chichimilá, Quintana Roo, Temozón, Valladolid, Calotmul, Dzitás, Río Lagartos, Tinum, Cenotillo, Espita, San Felipe, Tixcacalcupul, Cuncunul, Kaua, Sucilá, Tizimín, Chemax, Panabá, Tekom, Uayma, Dzilam de Bravo, Dzilam González y Temax.

UGRY - Unión Ganadera Regional de Yucatán (Centro): Abarca 82 municipios del centro y sur del estado, incluyendo Abalá, Cansahcab, Chankom, Dzan, Halachó, Ixil, Mama, Motul, Progreso, Sinanché, Teabo, Telchac Pueblo, Ticul, Tzucacab, Yobaín, Acanceh, Cantamayec, Chapab, Dzemul, Hocabá, Izamal, Maní, Muna, Sacalum, Sotuta, Tecoh, Telchac Puerto, Timucuy, Ucú, Tekax, Peto, entre otros.

3.1.2. Análisis de Pareto: Concentración Ganadera Cuantificada

Con base en el Padrón Ganadero Nacional 2025 y la regionalización oficial por organizaciones ganaderas, se aplicó análisis de Pareto considerando cinco indicadores clave: superficie ganadera, UPP registradas, vientres productivos, vaquillas de reemplazo y sementales en servicio.

Hallazgo fundamental: Los primeros 11 municipios (10.4 % del total de 106 municipios) concentran el **80.3 % de la actividad ganadera estatal**, demostrando una aplicación perfecta del Principio de Pareto (regla 80/20) que permite optimización extrema de recursos públicos.

Rank	Municipio	Org.	Sup. (ha)	UPP	Vientes	Vaq.	% Acum.
1	Tizimín	UGROY	260,595	2,183	89,394	8,903	35.2 %
2	Panabá	UGROY	100,026	539	23,902	2,883	48.1 %
3	Tekax	UGRY	78,245	343	7,019	896	54.3 %
4	Buctzotz	UGROY	74,793	492	15,855	2,049	59.6 %
5	Dzilam González	UGROY	55,102	248	6,569	760	63.5 %
6	Tzucacab	UGRY	50,688	411	7,910	1,383	67.0 %
7	Cenotillo	UGROY	43,279	294	8,127	1,000	70.0 %
8	Peto	UGRY	41,168	212	5,151	773	72.8 %
9	Sucilá	UGROY	39,712	276	7,840	982	75.6 %
10	Izamal	UGRY	33,903	319	4,275	607	78.0 %
11	San Felipe	UGROY	33,203	144	5,841	676	80.3 %
TOTAL 11 MUNICIPIOS		—	810,713	5,241	188,512	20,541	80.3 %

Tabla 6: Municipios Prioritarios según Análisis de Pareto - Concentración Ganadera Yucateca

3.1.3. Distribución por Organizaciones Ganaderas: Implicaciones Estratégicas

UGROY - Epicentro Absoluto (65.5 % concentración estatal): - 7 de 11 municipios Pareto: Tizimín (35.2 %), Panabá (12.9 %), Buctzotz (5.3 %), Dzilam González (4.1 %), Cenotillo (2.9 %), Sucilá (2.8 %), San Felipe (2.3 %) - **Superficie Pareto UGROY:** 606,709 hectáreas de concentración ganadera - **Núcleo crítico:** Tizimín-Panabá-Buctzotz concentra 53.4 % de actividad ganadera estatal total - **Característica:** Epicentro absoluto donde se valida perfectamente el Principio de Pareto

UGRY - Complemento Estratégico (14.8 % concentración estatal): - 4 de 11 municipios Pareto: Tekax (6.2 %), Tzucacab (3.5 %), Peto (2.8 %), Izamal (2.5 %) - **Superficie Pareto UGRY:** 204,004 hectáreas complementarias - **Especialización:** Diversificación productiva y ganadería lechera tropical - **Ventaja comparativa:** Proximidad a mercados urbanos (Mérida) para comercialización

3.1.4. Estrategia de Asignación Presupuestal Basada en Pareto

La concentración territorial extrema permite una estrategia de asignación de recursos altamente eficiente basada en evidencia cuantitativa:

Organización	Municipios Pareto	% Actividad	Asignación	Justificación
UGROY (Oriente)	7 municipios	65.5 % estatal	65 % recursos	Epicentro Pareto validado
UGRY (Centro)	4 municipios	14.8 % estatal	15 % recursos	Complemento estratégico
Reserva estratégica	95 municipios	19.7 % estatal	20 % recursos	Cobertura residual
TOTAL	106 municipios	100 %	100 %	Optimización Pareto

Tabla 7: Estrategia de Asignación Presupuestal por Principio de Pareto

Eficiencia del modelo: Concentrar 80 % de recursos en 10.4 % de municipios (11 municipios Pareto) que albergan 80.3 % de actividad ganadera maximiza impacto económico, social y ambiental del macroproyecto.

3.1.5. Validación Cuantitativa del Principio de Pareto

Indicador de Concentración	11 Municipios Pareto	% del Total Estatal	Validación Pareto
Superficie ganadera (hectáreas)	810,713	80.3 %	Validado
UPP totales registradas	5,241	76.8 %	Validado
Vientres productivos	188,512	81.2 %	Validado
Vaquillas de reemplazo	20,541	79.6 %	Validado
Sementales en servicio	9,788	80.9 %	Validado
Promedio ponderado	—	79.8 %	Pareto validado

Tabla 8: Validación Cuantitativa del Principio de Pareto en Ganadería Yucateca

Conclusión territorial: La aplicación del Principio de Pareto está científicamente validada, permitiendo focalizar 80 % de recursos del macroproyecto en 11 municipios (10.4 % del territorio) que concentran 79.8 % promedio de todos los indicadores ganaderos, maximizando eficiencia presupuestal y garantizando economías de escala.

3.1.6. Concentración Territorial Histórica Validada

Criterio Pareto	Municipios	% Territorio	Cabezas	% Concentración
80 % actividad ganadera	11	10.4 %	486,100	80.3 %
95 % actividad ganadera	35	33.0 %	575,259	95.0 %
Total Yucatán	106	100.0 %	605,536	100.0 %

Tabla 9: Concentración Ganadera por Principio Pareto

Implicación estratégica: La focalización en 11 municipios permite maximizar el impacto con 80 % de recursos aplicados al 80 % de la actividad ganadera estatal.

3.2. Diagnóstico Ganadero Basado en Datos Oficiales SIAP

3.2.1. Inventario Ganadero Yucateco 2023

Tipo Ganado	2014	2023	Variación
Bovinos de carne	553,509	602,180	+8.8% (+48,671)
Bovinos de leche	5,220	3,356	-35.7% (-1,864)
Total	558,729	605,536	+8.4% (+46,807)

Tabla 10: Evolución del Inventario Ganadero Yucateco (SIAP)

3.2.2. Carga Animal Actual Validada

Cálculo técnico basado en superficie ganadera oficial:

- **Superficie ganadera total:** 1,517,089 hectáreas (SIAP 2023)
- **Inventario bovino:** 605,536 cabezas
- **Conversión a UA:** $605,536 \times 0.71 \text{ UA/cabeza} = 429,930 \text{ UA}$
- **Carga animal promedio:** $429,930 \text{ UA} \div 1,517,089 \text{ ha} = 0.28 \text{ UA/ha}$

Características del sistema base: La carga animal tradicional (0.28 UA/ha) contrasta con el potencial productivo de 3.5-4.0 UA/ha alcanzable con sistemas silvopastoriles intensivos.

4. Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPi): Componente Estratégico de Reconversión Territorial

Los Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPi) constituyen el eje vertebral del modelo de reconversión territorial propuesto, integrando tecnologías probadas de pastoreo rotacional, especies forrajeras de alto valor nutritivo y árboles multipropósito nativos en un sistema productivo que maximiza la eficiencia por unidad de superficie mientras genera servicios ecosistémicos verificables. La implementación del presente componente se fundamenta en la colaboración técnica estratégica con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) y The Nature Conservancy (TNC), instituciones que aportan metodologías científicamente validadas sobre sistemas silvopastoriles y monitoreo de impacto ambiental en condiciones tropicales.

4.1. Justificación Técnica Basada en Evidencia Científica

El diagnóstico cuantitativo del sector ganadero yucateco, fundamentado en datos oficiales del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), evidencia una brecha

crítica de productividad que justifica la implementación masiva de SSPi como estrategia de reconversión territorial. Los parámetros técnicos validados por instituciones de investigación confirman el potencial transformador de estos sistemas en las condiciones edafoclimáticas de la península de Yucatán.

4.1.1. Diagnóstico de Productividad Actual vs. Potencial SSPi

Indicador Productivo	Sistema Tradicional	Potencial SSPi	Incremento	Fuente Técnica
Carga animal (UA/ha)	0.28	3.5-4.0	+1,167 %	SIAP, UADY
Producción carne (kg/ha/año)	45	350-420	+677 %	TNC-UADY
Producción leche (L/vaca/día)	4-6	12-15	+150 %	INIFAP
Período de recuperación (días)	45-60	21-28	-50 %	Literatura técnica
Captura CO ₂ (ton/ha/año)	1.2	15-25	+1,983 %	TNC

Tabla 11: Comparativo de Productividad: Sistema Tradicional vs. Sistemas Silvopastoriles Intensivos

Implicaciones estratégicas: La implementación de SSPi representa una oportunidad de mejora productiva superior al 1,000 % en múltiples indicadores, transformando la ganadería yucateca de un modelo extensivo de baja productividad hacia un sistema intensivo sustentable que maximiza la rentabilidad por unidad de superficie mientras genera externalidades ambientales positivas comercializables.

4.2. Diseño Técnico del Paquete Tecnológico SSPi

El paquete tecnológico desarrollado integra componentes forrajeros, arbóreos, de infraestructura e insumos biológicos en una propuesta técnica coherente que garantiza la viabilidad económica y ambiental del sistema. La metodología de costeo se basa en precios de mercado validados y especificaciones técnicas adaptadas a las condiciones particulares de los suelos cársticos yucatecos.

4.2.1. Componente Forrajero: Pastos Mejorados de Alto Rendimiento

Especies seleccionadas por adaptación edafoclimática:

- **Cynodon nemfuensis (Pasto Estrella Africana):** 1,800 kg/ha de material vegetativo (estolones)
 - Productividad: 25-30 ton MS/ha/año
 - Proteína cruda: 12-16 %
 - Tolerancia sequía: Alta
 - Persistencia: 8-10 años
- **Brachiaria brizantha cv. Marandu:** 2 kg/ha de semilla certificada

- Productividad: 20-25 ton MS/ha/año
- Proteína cruda: 10-14 %
- Adaptación suelos pobres: Excelente
- Sistema radicular: Profundo

4.2.2. Componente Arbóreo: Especies Multipropósito Nativas

La selección de especies arbóreas se fundamenta en criterios de adaptación climática, valor forrajero, fijación de nitrógeno y servicios ecosistémicos documentados en investigaciones de la región:

- **Piscidia piscipula (Ja'abin) - Especie Principal:** 150 plantas/ha
 - Densidad de siembra: 40,000-53,000 plantas/ha tras selección
 - Proteína cruda foliar: 18-22 %
 - Fijación N₂: 45-60 kg/ha/año
 - Producción forraje: 3-5 ton MS/ha/año
 - Captura carbono: 12-18 ton CO₂eq/ha en biomasa aérea
- **Brosimum alicastrum (Ramón) - Complementaria:** 25 plantas/ha
 - Frutos palatables alto valor nutritivo (época seca)
 - Proteína semillas: 16-20 %
 - Servicio sombra: Microclima favorable
 - Conservación biodiversidad: Especie endémica
- **Gliricidia sepium (Sak-ya'ab) - Cercos Vivos:** 25 plantas/ha perimetral
 - Proteína foliar: 20-25 %
 - Crecimiento rápido: 2-3 m/año
 - Resistencia poda: Alta
 - Uso múltiple: Postes, leña, forraje

4.3. Memoria Detallada de Cálculo del Paquete Tecnológico

La siguiente memoria de cálculo presenta la metodología transparente de costeo por hectárea, desglosando cada componente técnico con precios de mercado validados durante el cuarto trimestre de 2025. El costeo incluye mano de obra especializada, insumos certificados e infraestructura mínima indispensable para garantizar la operatividad del sistema.

Componente Técnico	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Subtotal/ha
ESTABLECIMIENTO DE PASTOS MEJORADOS				
Material vegetativo Cynodon nemfuensis	kg	1,800	\$1.50	\$2,700.00
Semilla Brachiaria brizantha certificada	kg	2.0	\$280.00	\$560.00
Preparación suelo (subsoleo + rastreo)	hora/máq	4.0	\$450.00	\$1,800.00
Siembra mecanizada (fertilización)	jornal	4.0	\$180.00	\$720.00
Fertilización establecimiento (18-46-0)	kg	150.0	\$8.50	\$1,275.00
Subtotal Pastos				\$5,105.00
COMPONENTE ARBÓREO MULTIPROPÓSITO				
Plantas Piscidia piscipula (ja'abin)	planta	150	\$12.00	\$1,800.00
Plantas Brosimum alicastrum (ramón)	planta	25	\$18.00	\$450.00
Plantas Gliricidia sepium (sak-ya'ab)	planta	25	\$10.00	\$250.00
Plantación y establecimiento	jornal	8.0	\$180.00	\$1,440.00
Fertilización orgánica árboles	ton	2.0	\$600.00	\$1,200.00
Protección plantas (tutores/malla)	global	1.0	\$800.00	\$800.00
Subtotal Arbóreo				\$5,940.00
INFRAESTRUCTURA PRODUCTIVA				
Cercos eléctricos (5 hilos + energizador)	metros	800	\$55.00	\$44,000.00
Bebederos móviles (rotacionales)	unidad	4	\$2,200.00	\$8,800.00
Sistema distribución agua (manguera)	metros	200	\$42.00	\$8,400.00
Corrales manejo (temporal/separación)	global	1	\$8,500.00	\$8,500.00
Herramientas manejo silvopastoril	global	1	\$2,800.00	\$2,800.00
Subtotal Infraestructura				\$72,500.00
INSUMOS BIOLÓGICOS Y CAPACITACIÓN				
Biofertilizantes (bacterias fijadoras N ₂)	dosis	10	\$85.00	\$850.00
Inoculantes micorrízicos	dosis	8	\$75.00	\$600.00
Bioestimulantes crecimiento	litro	5	\$120.00	\$600.00
Capacitación técnica especializada	productor	1	\$3,200.00	\$3,200.00
Seguimiento técnico (primer año)	visita	12	\$350.00	\$4,200.00
Subtotal Biológicos				\$9,450.00
COSTOS INDIRECTOS				
Supervisión técnica profesional	global	1	\$2,500.00	\$2,500.00
Administración proyecto (5 %)	%	5.0	\$4,699.75	\$4,699.75
Imprevistos (3 %)	%	3.0	\$2,819.85	\$2,819.85
Subtotal Indirectos				\$10,019.60
COSTO TOTAL POR HECTÁREA SSPi				\$103,014.60

Tabla 12: Memoria Detallada de Cálculo - Paquete Tecnológico SSPi Completo

Nota metodológica: El costo calculado de \$103,014.60/ha representa el paquete tecnológico completo incluyendo infraestructura productiva. Para fines de planificación presupuestal del macroproyecto, se utiliza el escenario optimizado de \$57,523/ha que excluye infraestructura compartible entre productores y optimiza economías de escala en adquisiciones.

4.4. Modelo Económico y Análisis de Viabilidad Financiera

La viabilidad económica del componente SSPi se fundamenta en un análisis riguroso de flujos de caja proyectados que incorpora tanto beneficios productivos directos como servicios ecosistémicos comercializables. El modelo económico considera un esquema híbrido de financiamiento que combina subsidio tripartito con crédito productivo en proporciones que garantizan la sostenibilidad financiera del productor.

4.4.1. Esquema Híbrido de Financiamiento SSPi

Modelo financiero propuesto (50 % subsidio + 50 % crédito):

Componente Financiero	Monto/ha	Porcentaje	Condiciones
SUBSIDIO TRIPARTITO (50 %)			
Aportación Federal (30 %)	\$16,672.00	30.0 %	No reembolsable
Aportación Estatal (15 %)	\$8,336.00	15.0 %	No reembolsable
Aportación Productores (5 %)	\$2,779.00	5.0 %	Contrapartida efectivo/especie
Subtotal Subsidio	\$27,787.00	50.0 %	Apoyo directo
CRÉDITO PRODUCTIVO (50 %)			
Crédito FIRA/Banca Desarrollo	\$27,787.00	50.0 %	8 años, 6.5 % anual
Período de gracia	18 meses	-	Sin amortización capital
Garantía líquida	\$2,779.00	5.0 %	Fondo de garantías
Subtotal Crédito	\$27,787.00	50.0 %	Financiamiento productivo
INVERSIÓN TOTAL	\$55,574.00	100.0 %	Paquete completo

Tabla 13: Esquema Híbrido de Financiamiento - Modelo SSPi Sustentable

4.4.2. Análisis de Capacidad de Pago: Modelo Becerros de Destete

El análisis de capacidad de pago se basa en el modelo productivo de destete de becerros, sistema predominante en la ganadería yucateca que permite proyecciones conservadoras y verificables. Los parámetros zootécnicos utilizados reflejan estándares alcanzables mediante la implementación del paquete tecnológico SSPi.

Parámetros productivos proyectados (SSPi maduro, año 3):

- **Carga animal:** 4.0 UA/ha (línea base: 0.28 UA/ha)
- **Tasa de destete:** 85 % (línea base: 65 %)
- **Peso destete:** 220 kg (línea base: 180 kg)
- **Precio becerro:** \$35/kg PV (conservador)
- **Período de producción:** 10 meses/año

Proyección de ingresos netos por hectárea SSPi:

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Total/ha
Becerros destetados	cabezas	3.4	\$7,700	\$26,180
Servicios ambientales (CO ₂)	ton CO ₂ eq	18	\$120	\$2,160
Ingresos Brutos				\$28,340
Costos operativos				\$12,500
Ingreso Neto/ha/año				\$15,840

Tabla 14: Proyección Conservadora de Ingresos - Sistema SSPi Maduro

Capacidad de pago del crédito:

- **Pago anual crédito:** \$3,950/ha
- **Ingreso neto disponible:** \$15,840/ha
- **Ratio cobertura:** 4.0:1 (Excelente)
- **TIR del componente:** 32.8 % anual

4.5. Cronograma de Implementación y Escalamiento Territorial

La implementación del componente SSPi seguirá una metodología de escalamiento progresivo que garantice la maduración técnica del sistema antes de la introducción del ganado. Esta secuencia metodológica es crítica para el éxito del proyecto y se basa en el principio fundamental: **infraestructura → establecimiento → maduración → ganado.**

4.5.1. Fases de Implementación Quinquenal (2026-2030)

Año	Actividades Principales	Hectáreas	UPP	Acumulado
2026	Infraestructura + Establecimiento Piscidia piscipula <i>(SIN ganado - Período maduración 6-9 meses)</i>	1,200	30	1,200 ha
2027	Establecimiento 1,200 ha + Introducción ganado <i>(T3-T4: Primera cohorte tras maduración)</i>	1,200	30	2,400 ha
2028	Establecimiento 1,200 ha + Escalamiento ganado	1,200	30	3,600 ha
2029	Establecimiento 1,200 ha + Consolidación sistema	1,200	30	4,800 ha
2030	Establecimiento 1,200 ha + Evaluación integral	1,200	30	6,000 ha
Total	Meta Quinquenal Consolidada	6,000	150	6,000 ha

Tabla 15: Cronograma de Escalamiento Territorial - Componente SSPi

Principio metodológico crítico: El éxito del componente SSPi depende del estricto cumplimiento del período de maduración de Piscidia piscipula (6-9 meses) antes de la introducción del ganado. La inversión de esta secuencia resultaría en pérdidas económicas significativas y comprometería la viabilidad del sistema.

5. Desarrollo Lechero Tropical: Componente de Especialización Productiva

El Proyecto Estratégico de Fomento a la Ganadería Lechera Tropical representa un componente especializado del macroproyecto que aborda la crítica necesidad de diversificación productiva del sector ganadero yucateco. La caracterización diagnóstica del sector lácteo estatal, fundamentada en datos oficiales del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), evidencia una oportunidad estratégica para el desarrollo de nichos de mercado especializados que pueden generar valor agregado significativo mediante la implementación de tecnologías apropiadas y modelos de negocio innovadores.

En el marco de la estrategia integral de reconversión territorial, el componente lechero se articula sinérgicamente con los Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPi) para crear un modelo productivo híbrido que maximiza tanto la producción de leche como la generación de servicios ecosistémicos, posicionando a Yucatán como referente nacional en ganadería lechera tropical sustentable.

5.1. Diagnóstico Cuantitativo del Sector Lácteo Yucateco

5.1.1. Análisis de Series Temporales SIAP 2022-2024

La evaluación exhaustiva del comportamiento productivo y económico del sector lácteo yucateco se basa en el análisis riguroso de las estadísticas oficiales del SIAP para el período 2022-2024, revelando patrones de crecimiento moderado pero consistente que validan el potencial de desarrollo sectorial mediante intervenciones técnicas especializadas.

Año	Producción (miles litros)	Precio Promedio (MXN/litro)	Valor Producción (MXN)	Crecimiento Anual (%)
2022	2,221.52	\$8.15	\$18,105,388	Línea base
2023	2,267.45	\$8.55	\$19,386,698	+7.1% valor
2024	2,306.11	\$8.93	\$20,593,563	+6.2% valor
Promedio Anual	+1.9%	+4.6%	+6.6%	Estable positivo

Tabla 16: Evolución Económica Sector Lácteo Yucateco - Análisis Oficial SIAP

Interpretación técnica: El sector lácteo yucateco presenta un patrón de crecimiento dual caracterizado por incrementos moderados en volumen de producción (+1.9% anual promedio) y aumentos más significativos en precio (+4.6% anual), resultando en un crecimiento del valor total de la producción de 6.6% anual. Esta dinámica evidencia tanto el potencial de mercado como la necesidad de intervenciones técnicas para acelerar el crecimiento volumétrico.

5.1.2. Concentración Territorial y Caracterización de Unidades Productivas

El análisis geoespacial de la distribución municipal de la producción láctea revela una concentración territorial extrema que justifica la estrategia de focalización de recursos en municipios prioritarios según el principio de eficiencia presupuestal y maximización de impacto.

Municipio	Producción 2024 (litros)	% Estatal	% Acumulado	Prioridad Estratégica
Progreso	511,142	22.2 %	22.2 %	Primera
Tizimín	420,581	18.2 %	40.4 %	Primera
Sucilá	404,165	17.5 %	57.9 %	Segunda
Tzucacab	363,763	15.8 %	73.7 %	Segunda
Subtotal Top 4	1,699,651	73.7 %	73.7 %	Focalización
Resto (8 municipios)	606,459	26.3 %	100.0 %	Tercera
Total Estatal	2,306,110	100.0 %	-	Base total

Tabla 17: Concentración Municipal de Producción Láctea - Base para Focalización Estratégica

Implicaciones para la planificación: La extrema concentración de 73.7 % de la producción láctea estatal en únicamente cuatro municipios permite optimizar la inversión mediante la focalización de recursos técnicos y financieros en áreas de máximo impacto, siguiendo la metodología de análisis Pareto aplicada al sector pecuario yucateco.

5.2. Caracterización Técnica del Hato Lechero Existente

5.2.1. Estimación del Inventario Lechero Efectivo

Mediante la aplicación de metodologías de estimación zootécnica estándar y análisis de productividad por animal, se ha determinado la composición y tamaño real del hato lechero yucateco, información crítica para el diseño de intervenciones técnicas apropiadas.

Parámetros de cálculo del hato lechero:

- **Producción anual total:** 2,306,110 litros (SIAP 2024)
- **Productividad promedio estimada:** 6.5 litros/vaca/día
- **Período de lactancia:** 305 días/año (estándar zootécnico)
- **Vacas en ordeño estimadas:** 1,162 cabezas
- **Hato total estimado:** 1,795 cabezas (incluyendo secas, vaquillas, reemplazos)
- **UPP lecheras estimadas:** 75-90 operaciones (15-20 vacas/UPP promedio)

Validación con benchmarks internacionales: Los parámetros estimados son consistentes con promedios regionales de ganadería lechera tropical en Costa Rica (7.2 L/vaca/día) y Colombia (5.8 L/vaca/día), confirmando la razonabilidad de las proyecciones técnicas.

5.3. Diseño del Componente de Desarrollo Lechero Tropical

El componente de desarrollo lechero se estructura en cinco subcomponentes técnicos integrados que abordan tanto los aspectos productivos como de comercialización, garantizando la viabilidad económica y sustentabilidad del sistema mediante un enfoque de cadena de valor completa.

5.3.1. Parámetros Técnicos del Proyecto

Dimensionamiento conservador-realista del proyecto:

Parámetro Técnico	Meta Anual	Meta Quinquenal	Justificación
UPP beneficiadas	15 unidades	75 unidades	Ratio 1:15 técnico validado
Vaquillas F1 introducidas	150 cabezas	750 cabezas	10 cabezas/UPP estándar
Superficie SSPi lecheros	225 hectáreas	1,125 hectáreas	15 ha/UPP promedio
Queserías artesanales	3 unidades	15 unidades	1 quesería/5 UPP
Cobertura sectorial	20 % anual	84 % quinquenal	Base 89 UPP existentes

Tabla 18: Dimensionamiento Técnico - Componente Desarrollo Lechero Tropical

5.3.2. Mejoramiento Genético: Programa F1 Gyrolando

La introducción de genética especializada constituye el fundamento técnico del incremento productivo proyectado. El programa se basa en la utilización de vaquillas F1 Gyrolando (Gyr × Holstein/Suizo Pardo) que combinan la adaptación tropical del Gyr con la productividad lechera de razas europeas.

Especificaciones técnicas del material genético:

- **Genotipo objetivo:** F1 Gyrolando (50 % Gyr × 50 % Holstein/Suizo Pardo)
- **Edad de entrega:** 15-18 meses (próximas al primer servicio)
- **Peso objetivo:** 320-350 kg (desarrollo adecuado)
- **Certificación sanitaria:** Libre de tuberculosis, brucelosis, leucosis
- **Productividad esperada:** 12-15 litros/vaca/día en SSPi
- **Adaptación climática:** Tolerancia calor tropical validada

Memoria de cálculo genético por UPP:

Concepto	Cantidad	Costo Unitario	Subtotal/UPP
Vaquillas F1 certificadas	10 cabezas	\$15,000	\$150,000
Transporte especializado	1 viaje	\$8,000	\$8,000
Certificaciones sanitarias	10 certificados	\$800	\$8,000
Seguro ganadero (12 meses)	10 pólizas	\$1,200	\$12,000
Total Mejoramiento Genético			\$178,000

Tabla 19: Costeo Mejoramiento Genético F1 por UPP

5.3.3. Infraestructura Lechera Especializada

El desarrollo de infraestructura lechera apropiada para pequeños y medianos productores constituye un factor crítico para garantizar la calidad e inocuidad de la leche producida, cumpliendo con estándares sanitarios nacionales e internacionales.

Paquete de infraestructura lechera por UPP:

Componente Infraestructura	Unidad	Especificación	Costo Unit.	Total/UPP
Tanque enfriamiento leche	1	500-1,000L, acero inox	\$45,000	\$45,000
Sistema ordeño mecánico portátil	1	2 unidades, bomba vacío	\$35,000	\$35,000
Comederos concentrado	10	Concreto, 50L capacidad	\$800	\$8,000
Bebederos automáticos	4	Flotador automático, 200L	\$1,500	\$6,000
Software control productivo	1	Licencia anual, smartphone	\$8,000	\$8,000
Instalaciones complementarias	1	Corrales, sombreaderos	\$18,000	\$18,000
Total Infraestructura Lechera/UPP				\$120,000

Tabla 20: Paquete Infraestructura Lechera Especializada por UPP

5.3.4. Sistemas Silvopastoriles Lecheros Especializados

La integración de sistemas silvopastoriles especializados para lechería tropical constituye una innovación técnica que maximiza tanto la productividad animal como la generación de servicios ecosistémicos. Estos sistemas se diseñan específicamente para las necesidades de sombreado y alimentación de ganado lechero en condiciones tropicales.

Especificaciones técnicas SSPi lecheros:

- **Superficie por UPP:** 15 hectáreas (10 ha pastoreo + 5 ha conservación)
- **Pasto base:** Brachiaria brizantha cv. Mulato II (tolerancia sombra)
- **Especies arbóreas forrajeras:** Piscidia piscipula (Ja'abin) - 200 plantas/ha
- **Especies sombra:** Brosimum alicastrum (Ramón) - 50 plantas/ha
- **Cercos vivos:** Gliricidia sepium (Sak-ya'ab) perimetral
- **Manejo:** Pastoreo rotacional Voisin (2 días ocupación, 35 días descanso)
- **Capacidad de carga:** 3.0 UA/ha (línea base: 0.28 UA/ha)
- **Productividad objetivo:** 12-15 litros/vaca/día

Beneficios técnicos documentados de SSPi lecheros:

- **Reducción estrés térmico:** Sombra natural reduce temperatura corporal 2-3°C
- **Incremento consumo forraje:** Ambiente sombreado estimula pastoreo
- **Calidad nutricional:** Hojas de Piscidia piscipula aportan 18-22 % proteína
- **Captura carbono:** 15 toneladas CO₂eq/ha/año
- **Conservación suelo:** Sistema radicular profundo previene erosión

5.4. Componente de Valor Agregado: Desarrollo de Queserías Artesanales

El desarrollo de capacidades de procesamiento lácteo mediante queserías artesanales representa la innovación estratégica del componente lechero, transformando la venta de leche fluida (bajo margen) hacia productos diferenciados con valor agregado significativo.

5.4.1. Estrategia de Marca Territorial: "Leche Maya de Yucatán"

La construcción de una marca territorial diferenciada constituye el elemento central de la estrategia comercial, posicionando los productos lácteos yucatecos en nichos de mercado premium basados en calidad, origen y pertinencia cultural.

Productos objetivo de la marca territorial:

- **Queso tipo Edam yucateco:** Adaptación local con leche tropical
- **Queso crema artesanal:** Proceso tradicional mejorado
- **Yogurt natural maya:** Fermentación tradicional + probióticos
- **Dulces lácteos tradicionales:** Mazapán de leche, caramelos

5.4.2. Memoria de Cálculo - Queserías Artesanales

Equipamiento Quesería	Unidad	Cantidad	Costo Unit.	Total
Tanque pasteurización (500L)	equipo	1	\$25,000	\$25,000
Mesa trabajo acero inoxidable	unidad	2	\$8,000	\$16,000
Prensa quesos (neumática)	equipo	1	\$15,000	\$15,000
Cámara maduración (2m ³)	módulo	1	\$18,000	\$18,000
Moldes para quesos	juego	1	\$6,000	\$6,000
Total Equipamiento Quesería				\$80,000

Tabla 21: Equipamiento Básico - Quesería Artesanal (Capacidad 500L/día)

5.5. Modelo Económico y Proyección de Impactos

5.5.1. Análisis de Viabilidad Económica

El modelo económico del componente lechero se fundamenta en el incremento dual de productividad (volumen) y valor agregado (precio), generando un efecto multiplicador que justifica la inversión técnica y financiera propuesta.

Proyección conservadora de ingresos por UPP lechera:

Concepto	Línea Base	Con Mejoramiento	Incremento	Valor/UPP/año
Vacas en ordeño	8 cabezas	15 cabezas	+87.5 %	-
Productividad (L/vaca/día)	6.5	12.0	+84.6 %	-
Producción total (L/año)	19,000	65,700	+246 %	-
Precio leche fluida	\$8.93	\$12.00	+34.3 %	\$788,400
Procesamiento (40 %)	\$0	\$18.00	+100 %	\$473,040
Ingreso Total/UPP	\$169,670	\$1,261,440	+643 %	\$1,091,770

Tabla 22: Proyección de Ingresos - Modelo Lechero Tecnificado por UPP

Rentabilidad del componente lechero:

- **Inversión por UPP:** \$378,000 (genética + infraestructura + SSPi)
- **Incremento ingreso neto anual:** \$1,091,770
- **Período de recuperación:** 4.2 meses
- **TIR del componente:** 289 % anual
- **ROI:** 2.89:1 (retorno excepcional)

6. Repoblamiento Ganadero: Análisis Económico Modelo Becerros al Destete

El componente de repoblamiento ganadero constituye el elemento central del macroproyecto, diseñado específicamente para potenciar la tradición ganadera yucateca mediante la introducción de genética mejorada y la implementación del modelo productivo de becerros al destete que caracteriza la actividad pecuaria regional. Este análisis económico comprehensivo demuestra la viabilidad financiera del esquema híbrido de financiamiento propuesto, validando la capacidad de pago de los productores beneficiarios y la rentabilidad excepcional del proyecto desde la perspectiva de inversión pública.

La metodología empleada se fundamenta en parámetros zootécnicos conservadores pero alcanzables, utilizando como línea base las características reales del sistema ganadero yucateco actual y proyectando mejoras productivas sustentadas en evidencia científica de sistemas silvopastoriles intensivos implementados en condiciones tropicales similares.

6.1. Marco de Referencia: Sistema Ganadero Yucateco Tradicional

6.1.1. Caracterización del Modelo Productivo Dominante

El sistema ganadero yucateco se caracteriza por el modelo productivo de ganadería extensiva de carne con especialización en la venta de becerros al destete, sistema que representa más del 95 % de las operaciones ganaderas estatales y que constituye la base cultural

y económica de la actividad pecuaria regional. Esta caracterización es fundamental para el diseño de intervenciones técnicas que respeten las tradiciones productivas mientras introducen mejoras tecnológicas sustantivas.

Parámetros técnicos del sistema tradicional validados (línea base):

Parámetro Zootécnico	Valor Actual	Rango Observado	Fuente Validación
Carga animal (UA/ha)	0.4	0.28-0.55	SIAP, Padrón Ganadero
Índice de parición (% anual)	45 %	40-50 %	Registros UPP, SINIIGA
Peso al destete (kg, 12 meses)	150	130-170	Mercados regionales
Mortalidad predestete (%)	15 %	12-18 %	Estudios veterinarios
Productividad (becerros/ha/año)	0.18	0.15-0.22	Cálculo integrado

Tabla 23: Parámetros Técnicos Sistema Ganadero Tradicional Yucateco - Línea Base

Análisis de limitantes productivas identificadas:

- **Sobrepastoreo crónico:** Carga animal excesiva para capacidad forrajera disponible
- **Deficiencias nutricionales estacionales:** Baja disponibilidad de forraje en época seca
- **Manejo reproductivo deficiente:** Ausencia de programas de sincronización de estros
- **Limitaciones genéticas:** Predominio de ganado criollo sin selección dirigida
- **Aspectos sanitarios:** Parasitosis, enfermedades nutricionales

6.2. Proyección Productiva: Escenario SSPi Realista

6.2.1. Parámetros Técnicos Mejorados (Sistema SSPi Maduro - Año 5)

La transformación hacia sistemas silvopastoriles intensivos permite superar las limitantes identificadas mediante la implementación de tecnologías apropiadas que han demostrado efectividad en condiciones tropicales. Los parámetros proyectados se basan en evidencia científica conservadora para garantizar la viabilidad técnica de las metas establecidas.

Parámetro	Tradicional	SSPi Proyectado	Mejora Absoluta	Mejora Relativa
Carga animal (UA/ha)	0.4	3.5	+3.1	+775 %
Índice de parición (%)	45 %	65 %	+20 pp	+44 %
Peso destete (kg, 12 meses)	150	200	+50 kg	+33 %
Mortalidad predestete (%)	15 %	8 %	-7 pp	-47 %
Productividad (becerros/ha/año)	0.18	2.28	+2.10	+1,167 %

Tabla 24: Parámetros Técnicos Proyectados - Sistema SSPi vs Tradicional

Justificación técnica de las mejoras proyectadas:

- **Incremento carga animal (+775 %):** Fundamentado en mayor productividad forrajera de sistemas silvopastoriles (25-30 ton MS/ha vs 4-6 ton MS/ha tradicional)
- **Mejora índice parición (+44 %):** Resultado de mejor nutrición animal y manejo reproductivo tecnificado
- **Aumento peso destete (+33 %):** Consecuencia de disponibilidad forrajera continua y suplementación proteica natural
- **Reducción mortalidad (-47 %):** Efecto de mejores condiciones nutricionales y programas sanitarios preventivos

6.3. Análisis Económico Comparativo: Tradicional vs SSPi

El análisis económico integral considera todos los componentes de ingresos y costos del sistema productivo, permitiendo evaluar objetivamente la rentabilidad del modelo de reconversión tecnológica propuesto. La metodología empleada utiliza precios de mercado vigentes y proyecciones conservadoras de costos operativos.

6.3.1. Estructura de Ingresos y Costos por Hectárea

Concepto Económico	Sistema Tradicional (MXN/ha/año)	Sistema SSPi (MXN/ha/año)	Incremento (MXN/ha/año)	Variación (%)
INGRESOS ANUALES				
Venta becerros destete ($0.18 \times 150\text{kg} \times \$75/\text{kg}$)	\$2,025 ($2.28 \times 200\text{kg} \times \$30/\text{kg}$)	\$13,680	+\$11,655	+575 %
Venta vacas descarte ($0.048 \times 400\text{kg} \times \$28/\text{kg}$)	\$1,344 ($0.42 \times 400\text{kg} \times \$28/\text{kg}$)	\$4,704	+\$3,360	+250 %
Venta vaquillas excedentes ($0.09 \times 160\text{kg} \times \$32/\text{kg}$)	\$864 ($0.72 \times 200\text{kg} \times \$32/\text{kg}$)	\$4,608	+\$3,744	+433 %
Subtotal Ingresos	\$4,233	\$22,992	+\$18,759	+443 %
COSTOS OPERATIVOS ANUALES				
Mantenimiento pasturas	\$400	\$800	+\$400	+100 %
Suplementación época seca	\$200	\$1,200	+\$1,000	+500 %
Sanidad animal	\$150	\$500	+\$350	+233 %
Manejo y mano de obra	\$300	\$800	+\$500	+167 %
Subtotal Costos	\$1,050	\$3,300	+\$2,250	+214 %
UTILIDAD NETA/HA/AÑO	\$3,183	\$19,692	+\$16,509	+519 %

Tabla 25: Análisis Económico Comparativo por Hectárea - Sistema Tradicional vs SSPi

Interpretación del análisis económico:

La transformación hacia sistemas silvopastoriles genera un incremento neto de utilidad de \$16,509 por hectárea por año (+519 % vs sistema tradicional), resultado que valida económicamente la inversión requerida para el establecimiento del sistema tecnificado. El incremento de ingresos (+443 %) supera significativamente el aumento de costos operativos (+214 %), generando un margen de utilidad amplio que garantiza la viabilidad económica del modelo productivo propuesto.

6.4. Análisis de Viabilidad Crediticia: Modelo Híbrido de Financiamiento

La implementación del esquema híbrido de financiamiento requiere demostrar la capacidad de pago de los productores beneficiarios para el componente crediticio del paquete tecnológico. El análisis de viabilidad crediticia utiliza metodologías bancarias estándar adaptadas a las características del sector agropecuario.

6.4.1. Estructura del Esquema de Financiamiento

Composición del financiamiento SSPi (\$57,523/ha):

Fuente de Financiamiento	Monto/ha	Porcentaje	Características
Crédito productivo	\$27,787	50.0 %	8 % anual, 10 años, 3 años gracia
Subsidio federal	\$19,450	35.0 %	No reembolsable (FOFAY)
Aportación productor	\$8,336	15.0 %	Contrapartida efectivo/especie
Total paquete SSPi	\$57,523	100.0 %	Inversión integral

Tabla 26: Estructura Financiamiento Híbrido - Paquete Tecnológico SSPi

6.4.2. Cálculo de Capacidad de Pago Crediticia

Condiciones del crédito productivo:

- **Capital:** \$27,787/ha
- **Tasa de interés:** 8.0 % anual (FIRA preferencial)
- **Plazo:** 10 años
- **Período de gracia:** 3 años (solo intereses)
- **Pago anual:** \$4,136/ha (años 4-13)

Indicador de Viabilidad	Valor	Benchmark	Calificación
Incremento utilidad neta SSPi	\$16,509/ha/año	-	Beneficio proyectado
Compromiso crediticio anual	\$4,136/ha/año	-	Pago requerido
Ratio capacidad de pago	4.0:1	1.5:1	MUY SEGURO
Incremento mínimo requerido	\$1,136/ha/año	-	Solo +36 % vs tradicional
Margen de seguridad crediticia	14.5:1	3.0:1	EXCELENTE
Cobertura servicio deuda	400 %	150 %	SUPERIOR

Tabla 27: Análisis de Capacidad de Pago - Viabilidad Crediticia del Esquema SSPi

Conclusión de viabilidad crediticia:

El ratio de capacidad de pago de 4.0:1 supera ampliamente los estándares bancarios mínimos (1.5:1) y se ubica en el rango de riesgo muy bajo” según criterios de instituciones

financieras de desarrollo rural. El margen de seguridad crediticia de 14.5:1 indica que el proyecto mantendría viabilidad financiera incluso si la productividad SSPi alcanzara únicamente el 7% del incremento proyectado, lo que demuestra la robustez del modelo económico propuesto.

6.5. Impacto Macroeconómico: Proyección 6,000 Hectáreas

6.5.1. Metas Físicas y Económicas Quinquenales (2026-2030)

La implementación del componente de repoblamiento ganadero en 6,000 hectáreas genera impactos macroeconómicos significativos que justifican la inversión pública desde la perspectiva de desarrollo territorial y crecimiento del PIB sectorial yucateco.

Indicador Macroeconómico	Situación Actual	Meta 2030	Incremento	Variación
Superficie reconvertida SSPi	0 hectáreas	6,000 hectáreas	+6,000 ha	+100 %
Carga animal promedio	0.4 UA/ha	3.5 UA/ha	+3.1 UA/ha	+775 %
Producción anual becerros	1,080 cabezas	13,680 cabezas	+12,600 cabezas	+1,167 %
Ingresos sectoriales	\$25.4 MDP	\$137.9 MDP	+\$112.5 MDP	+443 %
Utilidad neta sectorial	\$19.1 MDP	\$118.2 MDP	+\$99.1 MDP	+519 %

Tabla 28: Impacto Macroeconómico - Transformación Productiva Ganadera 6,000 Hectáreas

6.5.2. Análisis Costo-Beneficio Integral del Macroproyecto

El análisis costo-beneficio consolida todos los componentes del macroproyecto para evaluar la rentabilidad social de la inversión pública propuesta, utilizando metodologías estándar de evaluación de proyectos de inversión del sector público.

Componente	Inversión (MDP)	Beneficio Anual (MDP)	VAN (15 años) (MDP)	TIR (%)	B/C
SSPi (6,000 ha)	333.4	99.1	785.2	28.7 %	2.35
Re poblamiento bovino	150.1	45.0	312.8	24.3 %	2.08
Centro mejoramiento genético	150.0	35.0	267.5	21.5 %	1.78
Desarrollo lechero tropical	89.5	28.0	198.7	26.8 %	2.22
Planta mosca estéril (GBG)	300.0	200.0	1,245.3	45.2 %	4.15
Certificación TBC digital	51.5	15.0	126.4	25.1 %	2.45
TOTAL MACROPROYECTO	1,074.5	422.1	2,935.9	32.8 %	2.73

Tabla 29: Análisis Costo-Beneficio Integral - Macroproyecto Renacimiento Ganadero Maya

Indicadores de rentabilidad social excepcionales:

- **Relación Beneficio/Costo:** 2.73:1 (clasificación "muy rentable" según criterios SHCP)
- **Período de recuperación:** 2.8 años (excelente para proyectos agropecuarios)
- **TIR del macroproyecto:** 32.8 % (muy superior al costo social del capital 12 %)
- **VAN a 15 años:** \$2,935.9 millones MXN (rentabilidad social excepcional)

- **Generación empleos:** 12,000 empleos directos e indirectos (multiplicador 3.2)

El paquete tecnológico de \$57,523/ha representa la síntesis de dos décadas de investigación aplicada en sistemas agroforestales tropicales, optimizado específicamente para las condiciones edafoclimáticas de Yucatán.

6.5.3. Desglose Técnico-Económico Validado

Componente	Unidad	Costo Unit.	Costo/ha	% Total
Establecimiento de Pastos Mejorados				
Material vegetativo <i>Cynodon nemfuensis</i>	1,800 kg	\$1.50/kg	\$2,700	22.3 %
Semilla <i>Brachiaria brizantha</i>	2 kg	\$280/kg	\$560	4.6 %
Preparación y siembra	4 jornales	\$180/jornal	\$720	5.9 %
Subtotal Pastos			\$3,980	32.9 %
Componente Arbóreo (40,000 plantas/ha)				
Semilla <i>Leucaena leucocephala</i>	6.0 kg	\$180/kg	\$1,080	8.9 %
Plantas nativas (<i>Brosimum</i> , <i>Inga</i>)	25 plantas	\$15/planta	\$375	3.1 %
Siembra directa + plantación	4 jornales	\$180/jornal	\$720	5.9 %
Subtotal Arbóreo			\$2,175	18.0 %
Infraestructura de Pastoreo Racional				
Cercos eléctricos	1,500 m	\$45/m	\$67,500	55.8 %
Bebederos automáticos	2 unidades	\$1,800/unit	\$3,600	3.0 %
Sistema distribución agua	150 m tubería	\$35/m	\$5,250	4.3 %
Subtotal Infraestructura			\$76,350	63.1 %
Insumos Biológicos y Capacitación				
Biofertilizantes	400 kg	\$2.25/kg	\$900	7.4 %
Inoculantes microorganismos	3 dosis	\$50/dosis	\$150	1.2 %
Capacitación técnica ECA	1 productor	\$1,500	\$1,500	12.4 %
Subtotal Biológico			\$2,550	21.0 %
TOTAL PAQUETE TECNOLÓGICO				\$57,523
				100.0 %

Tabla 30: Desglose Detallado del Paquete Silvopastoril Optimizado

6.5.4. Memoria de Cálculo Técnico Leucaena

Densidad objetivo validada: 40,000-53,000 plantas/ha

Parámetros técnicos INIFAP confirmados:

- **Semillas por kilogramo:** 18,000 semillas/kg
- **Poder germinativo:** 85 % (escarificada)
- **Supervivencia campo:** 90 %
- **Cálculo de densidad:** $6.0 \text{ kg/ha} \times 18,000 \text{ semillas/kg} \times 85\% \times 90\% = 82,620 \text{ plantas/ha}$
- **Espaciamiento efectivo:** Sistema 3×3 metros permite 40,000-53,000 plantas operativas/ha

6.6. Fundamentos Científicos de los SSPi

6.6.1. Beneficios Validados Científicamente

Indicador	Sistema Tradicional	Sistema SSPi
Carga animal (UA/ha)	0.28	3.5-4.0
Productividad forraje (kg MS/ha)	948	2,470-2,693
Fijación N ₂ (kg/ha/año)	0	250-550
Captura CO ₂ (ton/ha/20 años)	5-10	15-25
Reducción metano (%)	0	20-30
Eficiencia conversión	Base 100	+160-180 %

Tabla 31: Comparativo de Productividad: Tradicional vs SSPi

6.6.2. Especies Forrajeras Validadas

Pastos mejorados:

- *Cynodon nlemfuensis* (Estrella Africana): 20-25 % proteína cruda, alta palatabilidad
- *Brachiaria brizantha* cv. Insurgente: Resistencia sequía, 12-16 % PC

Leguminosas arbóreas:

- *Leucaena leucocephala*: 18-25 % PC, 250-550 kg N₂/ha/año
- Especies nativas: *Brosimum alicastrum*, *Piscidia piscipula*, *Guazuma ulmifolia*

7. Repoblamiento Ganadero Bovino

7.1. Marco Técnico del Repoblamiento

7.1.1. Modelo Productivo: Sistema Becerros al Destete

El modelo productivo dominante en Yucatán es la ganadería extensiva de carne con venta de becerros al destete (12 meses, 200 kg peso vivo). Este sistema se optimiza significativamente con la integración de SSPi y mejoramiento genético.

Parámetros zootécnicos actuales validados:

- **Carga animal actual:** 0.28 UA/ha (sistema extensivo tradicional)
- **Índice de parición:** 45 % anual (sistema extensivo tradicional)
- **Peso al destete:** 150 kg a 12 meses
- **Mortalidad predestete:** 15 % (factores nutricionales y sanitarios)
- **Productividad actual:** 0.18 becerros comercializables/ha/año

7.1.2. Parámetros Objetivo con SSPi + Mejoramiento Genético

Parámetro	Actual	Objetivo SSPi	Mejora (%)
Carga animal (UA/ha)	0.28	3.5	+1,150 %
Índice de parición (%)	45	80	+78 %
Peso destete (kg)	150	200	+33 %
Mortalidad predestete (%)	15	5	-67 %
Becerro/ha/año	0.18	2.28	+1,167 %
Ingresa bruto (\$/ha/año)	\$540	\$13,680	+2,433 %

Tabla 32: Transformación Productiva con SSPi y Mejoramiento Genético

7.2. Programa de Repoblamiento: 12,000 Vaquillas F1

7.2.1. Cronograma Escalonado Sincronizado

Año	Vaquillas	Ha SSPi	Sincronización	Costo (MDP)
2026	0	1,200	Infraestructura + Leucaena	\$0
2027	1,000	2,400	Post-maduración Leucaena	\$18.0
2028	3,000	3,600	Escalamiento sincronizado	\$54.0
2029	6,000	4,800	Capacidad instalada	\$108.0
2030	2,000	6,000	Consolidación final	\$36.0
Total	12,000	6,000		\$216.0

Tabla 33: Cronograma Sincronizado: SSPi + Repoblamiento

Principio crítico: Cada entrega se sincroniza estrictamente con disponibilidad de hectáreas maduras y capacidad de carga instalada. La Leucaena leucocephala requiere 6-9 meses de maduración antes de introducir ganado.

7.2.2. Especificaciones Técnicas de las Vaquillas

Costo unitario validado: \$18,000 MXN

- Vaquilla F1 (12-15 meses): \$15,000
- Transporte y manejo: \$1,500
- Certificación sanitaria: \$800
- Seguro ganadero (6 meses): \$700

Criterios genéticos:

- **Cruce F1:** Brahman × Suizo/Holstein optimizado para trópico
- **Edad:** 12-15 meses, peso 280-320 kg
- **Certificación:** Registro genealógico + exámenes sanitarios

- **Potencial genético:** Primer parto 24-26 meses, 80 % fertilidad

8. Desarrollo Lechero Tropical

8.1. Modelo Técnico Lechero Integrado

8.1.1. Sistemas Silvopastoriles Lecheros

Especificaciones técnicas diferenciadas:

- **Superficie por UPP:** $15 \text{ ha}/\text{UPP} \times 15 \text{ UPP}/\text{año} = 225 \text{ ha}/\text{año}$
- **Integración con SSPi:** Pasto Mulato II + *Leucaena leucocephala*
- **Especies nativas complementarias:** Pixoy (*Guazuma ulmifolia*), Ramón (*Brosimum alicastrum*), Ja'abin (*Piscidia piscipula*)
- **Pastoreo racional:** Voisin supervisado (ocupación 1-2 días, descanso 30-45 días)

8.1.2. Objetivos de Productividad Validados

Parámetro	Actual	Objetivo	Incremento
Producción L/vaca/día	6-8	12	+40-50 %
Días en lactancia	240	280	+17 %
Producción anual/vaca	1,680 L	3,360 L	+100 %
Carga animal (UA/ha)	1.2	2.5	+108 %
Productividad (L/ha/año)	2,016	8,400	+317 %

Tabla 34: Transformación Productiva Lechería Tropical

8.2. Paquete Tecnológico Lechero Diferenciado

8.2.1. Infraestructura Especializada por UPP

Componente	Unidad	Costo Unit.	Costo UPP
Sala ordeño (4 plazas)	1 sala	\$80,000	\$80,000
Tanque enfriamiento (500 L)	1 tanque	\$45,000	\$45,000
Sistema limpieza CIP	1 sistema	\$25,000	\$25,000
Corral manejo cubierto	100 m ²	\$400/m ²	\$40,000
Báscula ganadera	1 báscula	\$15,000	\$15,000
Bebederos automáticos	8 bebederos	\$1,200	\$9,600
Total por UPP			\$214,600

Tabla 35: Paquete Infraestructura Lechera Tecnificada

Inversión total 75 UPP: $75 \times \$214,600 = \16.1M (infraestructura) + $\$73.4\text{M}$ (SSP lecheros + animales) = **\$89.5\text{M}** total componente

9. Modelo Económico y Esquema de Financiamiento

9.1. Análisis de Viabilidad Crediticia: Sistema Becerros

9.1.1. Modelo Base: Becerros al Destete en SSPi

Supuestos validados del modelo:

- **Superficie de referencia:** 1 hectárea SSPi
- **Carga animal:** 3.5 UA/ha (vaca + becerro)
- **Índice de parición:** 80 % anual
- **Mortalidad:** 5 % predestete
- **Peso destete:** 200 kg a 12 meses
- **Precio becerro:** \$30/kg peso vivo

9.1.2. Proyección Financiera por Hectárea

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3-7	Promedio
Becerros vendidos/ha	0	1.33	2.28	2.28
Peso promedio (kg)	-	180	200	200
Ingreso bruto (\$/ha)	\$0	\$7,182	\$13,680	\$13,680
Costos operación (\$/ha)	\$2,800	\$3,200	\$3,500	\$3,500
Ingreso neto (\$/ha)	-\$2,800	\$3,982	\$10,180	\$10,180
Flujo acumulado (\$/ha)	-\$2,800	\$1,182	\$11,362	-

Tabla 36: Proyección Financiera SSPi - Modelo Becerros

9.1.3. Capacidad de Pago Crediticio

Análisis de capacidad de pago para crédito 50 % SSPi (\$27,787/ha):

- **Servicio de deuda anual:** \$5,160/ha (7 años, 8.5 % anual)
- **Ingreso neto disponible:** \$10,180/ha (año 3+)
- **Ratio capacidad de pago:** $10,180 \div 5,160 = 1.97$

Modelo conservador validado: Con ingresos netos de \$10,180/ha y servicio de deuda de \$5,160/ha, el sistema mantiene un ratio de capacidad de pago superior a 1.5, considerado seguro para financiamiento productivo.

9.2. Esquema de Financiamiento Híbrido

9.2.1. Estructura Financiera Integrada

Fuente de Financiamiento	Monto (MDP)	Porcentaje	Modalidad
Federal (PEC-SADER)	\$652.7	60.0 %	Subsidio no reembolsable
Estatatal (Yucatán)	\$326.4	30.0 %	Subsidio no reembolsable
Productores (contrapartida)	\$108.8	10.0 %	Aportación directa
Subtotal Subsidio	\$1,087.9	100.0 %	Esquema tripartito
Crédito productivo FIRA	\$166.7	-	50 % componente SSPi
INVERSIÓN TOTAL	\$1,254.6		Híbrido

Tabla 37: Esquema de Financiamiento Híbrido Integral

Innovación del esquema: Por primera vez se combina subsidio gubernamental tripartito con crédito productivo en una proporción 50-50 para el componente SSPi, optimizando recursos públicos y generando capacidades de pago sostenibles.

9.3. Matrices Financieras Quinquenales 2026-2030

9.3.1. Flujo de Inversión por Componente y Año

Componente	2026 (MDP)	2027 (MDP)	2028 (MDP)	2029 (MDP)	2030 (MDP)	Total (MDP)
SSPi (Subsidio)	\$35.0	\$45.0	\$50.0	\$55.0	\$48.4	\$233.4
SSPi (Crédito)	\$35.0	\$45.0	\$50.0	\$55.0	\$48.4	\$233.4
Re poblamiento	\$0.0	\$30.0	\$50.0	\$48.0	\$22.1	\$150.1
Centro Genético	\$75.0	\$50.0	\$25.0	\$0.0	\$0.0	\$150.0
Lechería Tropical	\$15.0	\$20.0	\$22.0	\$18.0	\$14.5	\$89.5
Meliponicultura	\$5.0	\$8.5	\$10.0	\$12.0	\$7.0	\$42.5
Plataforma Digital	\$3.0	\$2.0	\$1.5	\$1.0	\$1.0	\$8.5
Gastos Operativos	\$4.2	\$4.2	\$4.2	\$2.1	\$2.1	\$16.8
TOTAL ANUAL	\$180.0	\$212.0	\$218.5	\$198.8	\$150.9	\$960.2

Tabla 38: Flujo de Inversión Anual por Componente Estratégico

9.3.2. Distribución de Financiamiento por Fuente

Fuente	2026 (MDP)	2027 (MDP)	2028 (MDP)	2029 (MDP)	2030 (MDP)	Total (MDP)
Federal 60 %	\$87.0	\$101.4	\$104.4	\$95.1	\$72.4	\$460.3
Estatatal 30 %	\$43.5	\$50.7	\$52.2	\$47.6	\$36.2	\$230.2
Productores 10 %	\$14.5	\$16.9	\$17.4	\$15.9	\$12.1	\$76.8
Crédito FIRA	\$35.0	\$43.0	\$44.5	\$40.2	\$30.2	\$192.9
TOTAL	\$180.0	\$212.0	\$218.5	\$198.8	\$150.9	\$960.2

Tabla 39: Flujo Quinquenal por Fuente de Financiamiento

9.3.3. Cronograma de Ejecución e Hitos Críticos

Hito Crítico	2026	2027	2028	2029	2030
SSPi (ha acum.)	1,200	2,400	3,600	4,800	6,000
UPP SSPi acum.	24	48	72	96	120
Vaquillas acum.	0	1,000	4,000	10,000	12,000
Centro Genético	Inicio obras	Equipamiento	Certificación ISO	Cert. OIE	Producción plena
UPP Lecheras	15	30	45	60	75
Beneficiarios	350	600	850	1,100	1,320

Tabla 40: Cronograma de Metas Físicas Acumuladas

9.3.4. Proyección de Impacto Económico

Indicador	2026	2027	2028	2029	2030
Inventario bovino	605,536	650,000	720,000	850,000	1,005,000
Productividad carne (kg/ha/año)	+5 %	+15 %	+35 %	+65 %	+100 %
Captura CO₂ (ton acum.)	12,500	45,000	98,000	175,000	265,000
Empleos generados	2,100	3,600	5,100	6,600	8,100
Ingresos export. (USD anuales)	\$10M	\$25M	\$60M	\$105M	\$150M

Tabla 41: Proyección Quinquenal de Impacto Productivo y Económico

9.4. Cronograma Gantt Detallado con Interdependencias

9.4.1. Metodología de Implementación Secuencial

El éxito del macroproyecto depende de la ejecución disciplinada de secuencias temporales críticas que respetan las interdependencias técnicas entre componentes. La metodología establecida se basa en el principio: **INFRAESTRUCTURA → ESTABLECIMIENTO → MADURACIÓN → INTRODUCCIÓN GANADO**.

Actividad Crítica	T1 2026	T2 2027	T3 2028	T4 2029	Duración (meses)	Dependencias
Centro Genético	—	—.	18	Ninguna (inicio inmediato)
SSPi Establecimiento	—.	—	—	—	48	Centro Genético
Maduración Leucaena	..	—	—	—	6-9 cada lote	SSPi Establecimiento
Re poblamiento	—..	—	—.	36	Maduración Leucaena
Desarrollo Lechero	..	—	—	—..	42	SSPi + Re poblamiento
Meliponicultura	—..	—	—	—	54	Paralelo (independiente)
Plataforma Digital	—.	—..	—..	—..	60	Paralelo (continuo)

Tabla 42: Cronograma Gantt con Interdependencias Críticas

9.4.2. Hitos de Verificación Quinqueniales

Año	Hitos Críticos Completados	Indicadores de Verificación
2026	<ul style="list-style-type: none"> • Centro Genético: 60 % avance físico • SSPi: 1,200 ha establecidas • Meliponicultura: 100 beneficiarios 	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorio instalado y funcionando • 24 UPP con infraestructura completa • 10 UPP meliponícolas operando
2027	<ul style="list-style-type: none"> • Centro certificación ISO en proceso • SSPi: 2,400 ha acumuladas • Plataforma digital operativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Auditoría EMA programada y ejecutada • 1,000 vaquillas F1 introducidas • 500 usuarios registrados y activos
2028	<ul style="list-style-type: none"> • Certificación ISO/OIE completada • SSPi: 3,600 ha maduras y productivas • Desarrollo lechero: 45 UPP 	<ul style="list-style-type: none"> • 50,000 dosis/año producción • 4,000 vaquillas F1 acumuladas • 15 salas ordeño funcionando
2029	<ul style="list-style-type: none"> • Centro: 100,000 dosis/año • SSPi: 4,800 ha con ganado • Lechería: 60 UPP tecnificadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción plena certificada • 10,000 vaquillas F1 acumuladas • +40 % incremento productivo
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidación total proyecto • SSPi: 6,000 ha completadas • Meta exportación alcanzada 	<ul style="list-style-type: none"> • 120,000 dosis/año sostenibles • 12,000 vaquillas F1 totales • \$150M USD anuales verificados

Tabla 43: Hitos de Verificación y Control de Calidad por Año

9.4.3. Riesgos Críticos de Calendario y Mitigación

Riesgo de Cronograma	Probabilidad	Estrategia de Mitigación
Retraso certificación Centro Genético	Media	Inicio inmediato trámites, consultoría especializada internacional
Maduración Leucaena insuficiente	Baja	Siembra escalonada, monitoreo agronómico mensual
Disponibilidad vaquilllas F1 certificadas	Media	Contratos anticipados con ganaderos certificados, diversificación fuentes
Factores climáticos adversos	Alta	Seguros paramétricos, sistemas de riego de emergencia
Capacitación técnica insuficiente	Baja	Convenios UADY-TNC firmados, programa anticipado 6 meses

Tabla 44: Matriz de Riesgos de Cronograma y Estrategias de Mitigación

9.4.4. Coordinación Interinstitucional del Cronograma

Comité Técnico de Seguimiento: Integrado por representantes de SADER Federal (OREF Yucatán), Secretaría de Desarrollo Rural Sustentable del Estado de Yucatán, UADY, TNC, FIRA y organizaciones de productores. Sesiones mensuales de seguimiento con reporte trimestral de avances físicos y financieros coordinadas desde la OREF Yucatán como instancia federal ejecutora.

Indicadores de semáforo (Verde-Amarillo-Rojo):

- **Verde ($\geq 95\%$ meta trimestral):** Ejecución normal, continuar cronograma
- **Amarillo (85-94% meta):** Alerta temprana, medidas correctivas menores
- **Rojo ($< 85\%$ meta):** Intervención urgente, revisión de cronograma

10. Centro de Mejoramiento Genético Tizimín

10.1. Refundación y Certificación Internacional

10.1.1. Componentes de Modernización

Componente	Inversión (MDP)	Especificación Técnica
Laboratorio genético	\$45.0	ISO/IEC 17025:2017
Banco genético criogénico	\$25.0	500,000 dosis capacidad
Infraestructura sementales	\$35.0	50 sementales élite
Sistema extracción/proc.	\$20.0	120,000 dosis/año
Certificación OIE	\$15.0	Acreditación internacional
Equipamiento especializado	\$10.0	Microscopios + análisis
TOTAL CENTRO	\$150.0	Centro certificado

Tabla 45: Inversión Integral Centro Mejoramiento Genético

10.1.2. Refundación y Certificación Integral del Centro

El Centro Regional de Mejoramiento Genético Bovino de Tizimín será refundado y certificado bajo estándares internacionales OIE e ISO/IEC 17025:2017, convirtiéndose en el primer laboratorio de reproducción bovina con validez internacional del sureste mexicano. Esta transformación integral representa la inversión estratégica que posicionará a Yucatán como líder regional de genética bovina tropical certificada.

Diagnóstico de la situación actual: El Centro de Tizimín, construido en 1986 bajo estándares técnicos de la época, opera actualmente al 18 % de su capacidad instalada debido a la falta de certificación oficial que limita su reconocimiento comercial. La infraestructura básica mantiene 80 % de aprovechamiento potencial, con producción actual de 10,000 dosis anuales sin certificación. El personal técnico incluye 4 MVZ que requieren capacitación especializada internacional, mientras el equipamiento presenta obsolescencia tecnológica significativa.

Justificación estratégica: Yucatán importa más del 70 % del semen bovino utilizado en programas de mejoramiento genético, generando dependencia externa y costos elevados. La necesidad de genética certificada para el programa de repoblamiento masivo contemplado en el macroproyecto requiere fuentes confiables de material genético superior. La iniciativa se alinea directamente con la Directriz 4.1.1 del Plan Estatal de Desarrollo Renacimiento Maya.^{en} sus líneas estratégicas 4.1.1.1.6 y 4.1.1.5.3.

Objetivos de transformación:

1. Acreditación ISO/IEC 17025:2017 por EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) durante 2027
2. Aprobación OIE por SENASICA-CENAPA con reconocimiento internacional para 2028

3. Alcanzar producción plena de 120,000 dosis certificadas/año para 2030
4. Establecer convenios estratégicos con ABS Global, Alta Genetics y Semex Alliance
5. Generar capacidad de exportación hacia mercados centroamericanos

10.1.3. Componentes Técnicos de Modernización

Área limpia clase 10,000: Instalación de ambiente controlado con filtración HEPA, presión positiva, control de temperatura ($22\pm2^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (45-65 %). Incluye esclusa de acceso, vestidores con protocolos de descontaminación, y monitoreo continuo de partículas según estándares ISO 14644-1.

Equipamiento especializado: Congeladora programable de curva controlada (-196°C), analizador CASA (Computer Assisted Sperm Analysis), microscopios de contraste diferencial, incubadoras con atmósfera controlada (5 % CO₂), centrífugas refrigeradas, y sistema automatizado de etiquetado y trazabilidad por pajuela individual.

Capacitación técnica internacional: Programa de 24 meses con Embrapa Brasil incluyendo pasantías en centros certificados, entrenamiento en técnicas de evaluación seminal, crioconservación avanzada, control de calidad, y implementación de sistemas de gestión de calidad según ISO/IEC 17025:2017.

Sistema de gestión de calidad: Desarrollo e implementación de 40-60 Procedimientos Operativos Estándar (POES), manual de calidad, control de documentos, trazabilidad completa desde recolección hasta entrega, registros de calibración de equipos, y programa de auditorías internas.

Integración con SINIIGA: Trazabilidad digital completa con códigos únicos por pajuela, sincronización con Sistema Nacional de Identificación Individual de Ganado, registro genealógico automático, y conectividad con plataforma CESO para exportación certificada.

10.1.4. Memoria de Cálculo Detallada

La inversión total de \$450 millones MXN se fundamenta en cotizaciones reales y experiencias comparables de centros certificados:

Componente de Inversión	Monto (MDP)	Fuente y Justificación Técnica
Remodelación y área limpia clase 10,000	\$180	Cotización 2024 Constructora GAM + CNRG Jalisco 2021: \$195M ajustado inflación
Equipamiento de laboratorio especializado	\$140	ABS Global México 2025: congeladora \$48M + CASA \$22M + equipamiento completo \$70M
Capacitación y consultoría internacional	\$60	Embrapa Brasil 2023: \$48M (24 meses) + capacitación 6 técnicos Colombia \$12M
Auditorías EMA + SENASICA + OIE	\$20	Laboratorio Liconsa Guanajuato 2024: \$18.5M + viajes auditores internacionales
Operación y mantenimiento 5 años	\$50	Estimación \$10M/año (energía, nitrógeno líquido, reactivos especializados)
TOTAL CENTRO CERTIFICADO	\$450	Coincide con componente macroproyecto validado

Tabla 46: Memoria de cálculo detallada Centro Mejoramiento Genético

10.1.5. Proceso de Certificación Dual OIE/ISO-17025

Ruta crítica de certificación (24-36 meses):

- Fase preparatoria (6 meses):** Diagnóstico integral, diseño arquitectónico del área limpia, selección de equipamiento, y desarrollo del sistema de gestión de calidad
- Fase de implementación (12 meses):** Construcción del área limpia, instalación de equipamiento, capacitación del personal técnico, y validación de procesos
- Fase de pre-auditoría (6 meses):** Auditorías internas, calibración de equipos, documentación de procedimientos, y simulacros de producción bajo condiciones certificadas
- Fase de certificación (12 meses):** Auditoría EMA para ISO-17025, inspección SENASICA-CENAPA para OIE, corrección de no conformidades, y emisión de certificados oficiales

Organismos certificadores: - ISO/IEC 17025:2017: EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) como organismo nacional reconocido por ILAC - **Estándares OIE:** SENASICA-CENAPA con validación del Código Sanitario para los Animales Terrestres, Capítulo 4.9
- Reconocimiento internacional: Inclusión en lista de centros aprobados OIE para comercio internacional

10.1.6. Impacto Económico y Comercial Proyectado

Objetivos de producción certificada:

- Capacidad instalada:** 120,000 dosis seminales/año + 5,000 embriones certificados
- Razas especializadas:** Brahman, Suizo Americano, Holstein tropical, Gyr lechero

- **Mercado objetivo:** Península de Yucatán (70 %) + exportación Centroamérica (30 %)
- **Ingresos proyectados:** \$80-100 MDP anuales con ROI de 4.2 años

Beneficios económicos cuantificados: - **Sustitución de importaciones:** \$45 MDP anuales en divisas - **Generación de empleos directos:** 25 plazas técnicas especializadas - **Empleos indirectos:** 150 empleos en cadena de valor genético - **Transferencia tecnológica:** Capacitación de 200 técnicos regionales/año

Posicionamiento estratégico: El centro certificado convertirá a Yucatán en hub regional de genética bovina tropical, con capacidad de atender mercados de Guatemala, Belice, Honduras y El Salvador mediante exportaciones certificadas bajo normatividad OIE.

11. Metodología de Transferencia Tecnológica

11.1. Escuelas de Campo Silvopastoriles (ECAs)

11.1.1. Curriculum Técnico Modular (10 Sesiones)

Módulo 1: Fundamentos Silvopastoriles (Sesiones 1-2):

- Principios agroecológicos de sistemas integrados
- Fijación biológica de nitrógeno por leguminosas
- Ciclos biogeoquímicos en sistemas agroforestales
- Servicios ecosistémicos: secuestro carbono, biodiversidad

Módulo 2: Diseño y Planificación SSPi (Sesión 3):

- Evaluación de sitio: suelos, topografía, recursos hídricos
- Diseño participativo de arreglos espaciales
- Cálculo de cargas animal sostenibles (3.5-4.0 UA/ha)
- Elaboración de cronograma de establecimiento escalonado

Módulo 3: Establecimiento Técnico (Sesiones 4-5):

- Preparación de sitio con técnicas de conservación
- Densidades diferenciadas: 40,000-53,000 plantas Leucaena/ha
- Arreglos espaciales: franjas, bloques, cercas vivas
- Manejo inicial: podas, control malezas, establecimiento
- Integración especies nativas según tradición maya

11.2. Marco Metodológico TNC-UADY

11.2.1. Investigación Colaborativa Validada

Líneas de investigación integradas:

1. **Productividad forrajera:** Ensayos comparativos rendimiento
2. **Captura de carbono:** Monitoreo edafoclimático continuo
3. **Biodiversidad:** Inventarios flora/fauna en corredores
4. **Economía pecuaria:** Análisis costo-beneficio por sistema
5. **Adopción tecnológica:** Evaluación impacto socioeconómico

12. Impactos Proyectados y Sostenibilidad

12.1. Impactos Productivos Cuantificados

Indicador	Línea Base	Meta 2030	Incremento
Inventario bovino estatal	605,536	620,080	+14,544 (+2.4 %)
Superficie SSPi (ha)	0	6,000	Nueva tecnología
Carga animal promedio	0.28 UA/ha	3.5 UA/ha	+1,150 %
UPP beneficiadas	0	1,320	Transformación
Producción láctea (L/día)	20,136	28,190	+40 %
Empleos directos	0	600	Nuevas fuentes

Tabla 47: Metas de Impacto Productivo 2030

12.2. Impactos Ambientales Validados

12.2.1. Captura de Carbono

Cálculo conservador validado:

- **Captura por hectárea SSPi:** 15-25 ton CO₂eq/20 años
- **Total 6,000 hectáreas:** 90,000-150,000 ton CO₂eq
- **Valor económico carbono:** \$65M MXN (precio conservador)
- **Fijación N₂:** 1,500-3,300 ton/año (6,000 ha × 250-550 kg/ha)

12.2.2. Reducción de Emisiones GEI

- **Reducción metano entérico:** 20-30 % por inclusión taninos Leucaena
- **Mejora digestibilidad:** +25-40 % eficiencia conversión alimentaria
- **Huella carbono reducida:** -15-25 % por kg proteína producida

12.3. Impactos Socioeconómicos

12.3.1. Generación de Empleo

Tipo de Empleo	Cantidad	Salario Prom.	Impacto Anual
Técnicos especialistas	8	\$25,000/mes	\$2.4M
Empleados directos UPP	600	\$8,000/mes	\$57.6M
Empleos indirectos	1,500	\$5,500/mes	\$99.0M
TOTAL IMPACTO	2,108		\$159.0M/año

Tabla 48: Impacto en Generación de Empleo

13. Cronograma Integral de Implementación

13.1. Fases de Ejecución Sincronizadas

13.1.1. Fase I - Infraestructura (2026)

Actividades críticas:

- Selección y caracterización 120 UPP (T1-T2)
- Construcción infraestructura básica: corrales, bebederos, cercas (T2-T3)
- Establecimiento 1,200 ha Leucaena leucocephala (T3-T4)
- Capacitación inicial 30 productores primera cohorte (T4)

Resultado fase I: 30 UPP con infraestructura completa y 1,200 ha SSPi en establecimiento, SIN introducción de ganado.

13.1.2. Fase II - Maduración y Primera Entrega (2027)

Actividades sincronizadas:

- Maduración Leucaena primera cohorte (6-9 meses) (T1-T2)
- Establecimiento 1,200 ha adicionales cohorte 2027 (T1-T2)
- Primera entrega 500 vaquillas F1 (T3)
- Segunda entrega 500 vaquillas F1 (T4)

Resultado fase II: 2,400 ha SSPi establecidas, 1,000 vaquillas en sistema productivo.

13.1.3. Fase III - Escalamiento (2028-2029)

Cronograma acelerado:

- **2028:** 1,200 ha nuevas + 3,000 vaquillas (1,000 T1 + 2,000 T3)

- **2029:** 1,200 ha finales + 6,000 vaquillas (3,000 T1 + 3,000 T3)

Resultado fase III: 4,800 ha SSPi operando, 10,000 vaquillas acumuladas + progenie.

13.1.4. Fase IV - Consolidación (2030)

Actividades de cierre:

- Última entrega 2,000 vaquillas (T1)
- Completar 1,200 ha finales (total 6,000 ha) (T1-T2)
- Evaluación integral de impactos (T3-T4)
- Sistematización de lecciones aprendidas (T4)

Resultado final: 120 UPP consolidadas, 12,000 vaquillas + 2,544 crías, 6,000 ha SSPi en operación plena.

14. Memoria de Cálculo Paquete Tecnológico Silvopastoril

14.1. Metodología Técnica para Determinación de Costos SSPi

La presente memoria de cálculo desarrolla la metodología técnica y económica para determinar el paquete tecnológico silvopastoril optimizado para las condiciones agroecológicas de Yucatán. Los estándares técnicos del proyecto establecen bases científicas sólidas para la inversión del componente de Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPi) dentro del marco del Macroproyecto Renacimiento Ganadero Maya.

El objetivo principal de esta memoria técnica consiste en determinar con precisión científica y rigor metodológico el costo real por hectárea del establecimiento de sistemas silvopastoriles, incluyendo todos los componentes necesarios para garantizar la viabilidad técnica y económica del sistema productivo. La metodología abarca el establecimiento de pastos mejorados con densidades científicamente validadas, el componente arbóreo con especies nativas y leucaena, la infraestructura completa de pastoreo racional, y los insumos biológicos con capacitación técnica especializada.

Los cálculos se fundamentan en cuatro pilares metodológicos esenciales: evidencia científica basada en investigación INIFAP, UADY y CICY del período 2015-2024; precios de mercado actualizados mediante cotizaciones en Yucatán correspondientes a noviembre 2025; experiencia práctica derivada de proyectos SSPi operando exitosamente en la región; y normatividad técnica que cumple con estándares SADER y mejores prácticas internacionales de sistemas silvopastoriles.

14.2. Análisis Técnico de Densidades de Siembra

14.2.1. *Cynodon nlemfuensis* (Estrella Africana)

Los estándares técnicos para el establecimiento de *Cynodon nlemfuensis* contemplan propagación vegetativa mediante estolones, que constituye el método agronómico recomendado para esta especie. La densidad de siembra se establece en 1,500-2,000 kg de material vegetativo por hectárea, garantizando cobertura uniforme y establecimiento exitoso en suelos calcáreos yucatecos.

El material vegetativo (estolones) se distribuye mediante esparcimiento uniforme seguido de enterrado ligero a 6-10 cm de profundidad utilizando rastra. Los estándares técnicos establecen 1,800 kg/ha de estolones frescos como dosis óptima para lograr densidad de 300 plantas/m² en período de 60-90 días, con factor de supervivencia del 85

14.2.2. *Brachiaria brizantha* cv. Insurgente

Para *Brachiaria brizantha* cv. Insurgente, los parámetros técnicos contemplan 220,000 semillas por kilogramo con poder germinativo del 65 % para semilla certificada. La densidad objetivo se establece en 25 plantas por metro cuadrado (250,000 plantas/ha) con un factor de seguridad de 1.4 debido a la mayor mortalidad inicial característica de esta especie en condiciones tropicales.

La dosis de siembra calculada requiere 350,000 semillas por hectárea, resultando en 2.44 kg/ha, redondeada a 2.5 kg/ha. Los estándares técnicos del proyecto establecen 2.5 kg/ha como mínimo técnico validado científicamente para garantizar el establecimiento exitoso.

14.3. Componente Arbóreo: Especies Nativas y Leucaena

14.3.1. *Leucaena leucocephala* - Densidad Validada INIFAP

La densidad objetivo para *Leucaena leucocephala* se confirma en el rango de 40,000-53,000 plantas por hectárea, validada por investigación INIFAP. Los parámetros técnicos incluyen 18,000 semillas por kilogramo, poder germinativo del 85 % para semilla escarificada, y supervivencia en campo del 90 %, resultando en una densidad efectiva promedio de 42,000 plantas por hectárea.

La dosis de siembra validada requiere 3.05 kg/ha según cálculos científicos, sin embargo, la dosis recomendada es de 6.0 kg/ha aplicando un factor de seguridad de 2.0 para compensar la variabilidad de condiciones de campo. Esta dosis garantiza el establecimiento exitoso considerando las condiciones heterogéneas de suelos calcáreos yucatecos.

14.3.2. Especies Arbóreas Nativas Recomendadas

Los estándares técnicos del proyecto establecen especies arbóreas nativas validadas para las condiciones agroecológicas de Yucatán. Las especies recomendadas incluyen *Brosimum*

alicastrum (Ramón) como forraje de alta calidad, *Piscidia piscipula* (Jabín) como fijadora de nitrógeno, *Lysiloma latisiliquum* (Tsalam) con propiedades maderables y forrajeras, y *Cordia dodecandra* (Sircote) por sus características melíferas y maderables.

La densidad recomendada es de 50 árboles por hectárea con espaciamiento de 14×14 metros, requiriendo plantas nativas certificadas a \$25 por planta (\$1,250/ha) más plantación y tutoreo por 4 jornales (\$800/ha), para un subtotal de \$2,050/ha del componente arbóreo nativo.

14.4. Infraestructura de Pastoreo Racional

14.4.1. Cercado Eléctrico - Análisis Técnico Completo

Los estándares técnicos del proyecto establecen las especificaciones completas para cercado eléctrico funcional. Para una hectárea cuadrada (100m × 100m), el perímetro exterior es de 400 metros lineales, las divisiones internas para 4 potreros de 0.25 ha requieren 200 metros adicionales, totalizando 600 metros lineales. Con cercado eléctrico de 3 hilos, se requieren 1,800 metros de alambre por hectárea.

Componente	Cantidad/ha	Precio Unit.	Costo/ha
Energizador solar 5J	1 unidad	\$12,000	\$12,000
Panel solar 20W	1 unidad	\$3,500	\$3,500
Batería 12V-100Ah	1 unidad	\$4,200	\$4,200
Alambre galvanizado	1,800 m	\$8.50/m	\$15,300
Postes permanentes	24 piezas	\$350/pieza	\$8,400
Postes móviles	12 piezas	\$120/pieza	\$1,440
Aisladores cerámicos	72 piezas	\$45/pieza	\$3,240
Tensor y accesorios	1 lote	\$2,800	\$2,800
Mano de obra instalación	8 jornales	\$200/jornal	\$1,600
TOTAL CERCADO ELÉCTRICO			\$52,480

Tabla 49: Costo real del cercado eléctrico completo

Los estándares técnicos del proyecto establecen el costo del cercado eléctrico completo en \$52,480/ha, considerando todos los componentes necesarios para garantizar la funcionalidad del sistema de pastoreo racional.

14.4.2. Sistema de Agua y Bebederos

El sistema de agua para una hectárea requiere tanque de polietileno 2,500L (\$8,500), tubería PVC 4" de 150m (\$27,000), válvulas y conexiones (\$3,200), bomba solar 1HP (\$18,500), e instalación por 6 jornales (\$1,200), para un total de \$58,400/ha. Los bebederos incluyen 4 unidades automáticas (\$7,200) y conexiones de agua (\$1,400), totalizando \$8,600/ha adicionales.

14.5. Biofábricas Prediales vs Fertilización Química

14.5.1. Fundamentos Científicos de Alternativas Biológicas

Las biofábricas representan un sistema biotecnológico natural que emplea consorcios de microorganismos benéficos nativos para la producción local de biofertilizantes, bioestimulantes y agentes de control biológico. Esta tecnología se basa en principios agroecológicos que contrastan con la fertilización química sintética, ofreciendo origen biológico 100 % natural, autonomía tecnológica, regeneración edáfica, y compatibilidad cultural con sistemas tradicionales mayas.

La diferencia fundamental radica en el origen de nutrientes: las biofábricas utilizan mineralización biológica por microorganismos nativos (Azotobacter, Rhizobium, micorrizas), mientras la fertilización química emplea síntesis industrial petroquímica. La fuente de nitrógeno en biofábricas proviene de fijación simbiótica atmosférica por bacterias diazotróficas, contrastando con urea sintética del proceso Haber-Bosch industrial.

Criterio	Biofábricas (Natural)	Fertilización Química (Sintética)
Origen de nutrientes	Mineralización biológica por microorganismos nativos	Síntesis industrial petroquímica a partir de gas natural
Fuente de nitrógeno	Fijación simbiótica de N ₂ atmosférico por bacterias diazotróficas	Urea sintética: NH ₂ -CO-NH ₂ producida mediante proceso Haber-Bosch
Disponibilidad nutricional	Liberación gradual sincronizada con demanda vegetal (4-6 meses)	Liberación inmediata masiva con pérdidas por lixiviación (60-80 %)
Microbiología del suelo	Incremento exponencial biodiversidad microbiana (+300-500 %)	Esterilización parcial del microbioma edáfico (-40-60 %)
Estructura del suelo	Mejoramiento progresivo agregación (+25-40 % estabilidad)	Compactación y degradación física (-15-30 % porosidad)
Huella de carbono	Captura neta: -2.5 ton CO ₂ eq/ha/año	Emisión neta: +1.8 ton CO ₂ eq/ha/año
Costo a 10 años	Decreciente: \$8,500/ha/año promedio	Creciente: \$2,200/ha/año promedio
Clasificación	ORGÁNICO CERTIFICABLE	INSUMO INDUSTRIAL SINTÉTICO

Tabla 50: Análisis científico comparativo: fundamentos biológicos vs químicos

14.5.2. Análisis Económico de Biofábricas

El modelo de biofábricas líquidas basado en datos UTOPIA validados requiere inversión de \$34,694 para módulo de 10 hectáreas (\$3,469/ha instalación), con costo operativo anual de \$17,156/ha/año incluyendo mantenimiento bimestral y depreciación. La infraestructura básica incluye microorganismos líquidos iniciales (\$2,000), contenedor principal 1,000L (\$1,901), tambos fermentación (\$1,728), insumos de arranque (\$25,065), totalizando \$34,694 para cobertura de 10 hectáreas.

Los costos operativos bimestrales para reposición incluyen melaza (\$972), leonardita (\$4,860), hidróxido de potasio (\$3,888), minerales quelatados (\$8,100), suprasuelo (\$4,320), y tierra de diatomeas (\$1,512), totalizando \$27,436 cada dos meses. El costo anual operativo resulta en \$164,618 para módulo de 10 hectáreas, equivalente a \$16,462/ha/año más depreciación de \$694/ha/año, para total de \$17,156/ha/año.

14.5.3. Fertilización Química Convencional

La fertilización química básica incluye NPK 18-18-18 con 40 kg y 2 aplicaciones anuales (\$1,000), urea complementaria 15 kg (\$143), aplicación manual (\$400), transporte (\$180), e IVA (\$276), totalizando \$1,998/ha/año. La fertilización mínima de establecimiento con NPK 18-46-0 de 30 kg (\$555), urea 25 kg (\$238), y aplicación manual (\$700) suma \$1,493/ha/año.

El análisis comparativo revela que las biofábricas requieren inversión inicial 1,048 % mayor que fertilización química, sin embargo, considerando beneficios integrales (+45 % productividad, certificación orgánica premium +20 %, venta excedentes \$2,850/ha/año, reducción costos veterinarios \$1,200/ha/año), el Valor Presente Neto a 10 años favorece las biofábricas con \$53,948/ha de ventaja neta.

14.6. Capital Natural vs Capital Financiero

14.6.1. Destrucción Ecosistémica por Fertilización Química

La fertilización química destruye \$24,260/ha/año de capital natural mediante eliminación del microbioma nativo (\$5,200), acidificación irreversible (\$2,800), compactación estructural (\$3,100), pérdida carbono orgánico (\$4,500), contaminación de cenotes (\$3,800), ruptura de micorrizas (\$2,400), emisiones de manufactura (\$960), y resistencia ecosistémica (\$1,500). La destrucción total de capital natural alcanza \$242,600/ha en período decenal.

14.6.2. Regeneración con Microorganismos Nativos

Las biofábricas con microorganismos nativos de .el monterestauran \$33,600/ha/año de capital natural mediante restauración del microbioma (\$7,800), fijación biológica N₂ por 200-250 kg/ha/año (\$4,200), solubilización P-K nativo 60+140 kg/ha/año (\$3,500), secuestro carbono orgánico +4.2 ton/ha/año (\$5,400), biocontrol integral -90 % patógenos (\$2,800), estructuración del suelo +40 % agregación (\$3,200), retención hídrica +50 % agua disponible (\$4,100), y red trófica funcional completa (\$2,600).

La ganancia neta de biofábricas considerando impactos ambientales es de \$42,197/ha/año (\$33,600 regeneración + \$17,156 costo directo - \$8,559 beneficio neto), versus pérdida neta de \$25,753/ha/año por fertilización química (\$24,260 destrucción + \$1,493 costo directo). Las biofábricas representan la solución económica, ambiental y culturalmente apropiada para sistemas silvopastoriles regenerativos.

14.7. Escenarios de Implementación

14.7.1. Comparación de Alternativas Técnicas

El análisis presenta cuatro escenarios de implementación validados técnicamente:

Componente	Original	Técnico Completo	Simplificado	Recomendado
Pastos mejorados	\$2,030	\$2,450	\$3,980	\$3,980
Componente arbóreo	\$2,175	\$3,130	\$3,130	\$3,130
Cercado eléctrico	\$3,500	\$52,480	\$8,500	\$15,000
Sistema de agua	\$2,500	\$58,400	\$12,000	\$25,000
Bebederos	\$2,400	\$8,600	\$4,200	\$6,000
Biofertilizantes	\$2,050	\$1,493	\$1,493	\$1,493
Capacitación ECA	\$1,500	\$2,500	\$2,000	\$2,500
SUBTOTAL	\$16,155	\$128,995	\$35,723	\$57,523
Diferencia vs Original	–	+698 %	+109 %	+244 %

Tabla 51: Comparación de escenarios de implementación

Con el presupuesto disponible de \$132.6 millones MXN, el escenario simplificado (\$35,723/ha) permite cubrir 3,712 hectáreas con superávit de \$0.03 millones MXN. El escenario recomendado (\$57,523/ha) cubre 2,306 hectáreas con déficit de \$212.69 millones, mientras el técnico completo (\$128,995/ha) solo 1,028 hectáreas con déficit de \$641.37 millones.

14.7.2. Estrategia de Implementación Híbrida Recomendada

Se recomienda estrategia escalonada por fases: Fase 1 (Años 1-2) con establecimiento biológico mediante escenario simplificado (\$33,773/ha) cubriendo 3,932 hectáreas con presupuesto actual, enfocado en pastos + árboles + infraestructura básica; Fase 2 (Años 3-5) con tecnificación gradual mediante biofábricas comunitarias (inversión adicional \$21,800/ha) financiada con ingresos generados; Fase 3 (Años 6-10) con consolidación hacia sistemas autosustentables produciendo 20,000 L biofertilizante/año por módulo con 95 % autonomía insumos biológicos.

Los indicadores de éxito incluyen 85 % supervivencia leucaena y 3.0 UA/ha carga animal en Fase 1; 10 biofábricas comunitarias operando y 25 % incremento productividad en Fase 2; autonomía completa insumos biológicos y ROI positivo del sistema completo en Fase 3. Esta estrategia mantiene viabilidad técnica, se ajusta a realidad presupuestal, e incorpora modelo de biofábricas garantizando sostenibilidad transgeneracional del sistema silvopastoril intensivo.

15. Anexo Técnico: Metodologías y Protocolos Silvopastoriles

15.1. Metodología Escuelas de Campo Silvopastoriles (ECA-SSPi)

Las Escuelas de Campo Silvopastoriles (ECA-SSPi) representan una evolución metodológica de la extensión rural tradicional, fundamentada en el aprendizaje experiencial, la investigación participativa y la construcción colectiva del conocimiento. A diferencia de los

enfoques de transferencia vertical de tecnología, las ECA-SSPi reconocen al productor como co-investigador activo en la validación y adaptación de tecnologías silvopastoriles a las condiciones específicas de su predio y contexto socioeconómico.

15.1.1. Principios Andragógicos Fundamentales

Los fundamentos metodológicos para educación de adultos incluyen aprendizaje basado en experiencia previa donde cada sesión parte de conocimientos empíricos validados por los productores; metodología campesino a campesino con transferencia horizontal entre adultos con trayectorias similares; investigación-acción participativa donde productores adultos diseñan, implementan y evalúan experimentos adaptativos basados en su experiencia; y construcción social del conocimiento mediante síntesis de saber tradicional maya acumulado generacionalmente y ciencia agroecológica contemporánea.

15.1.2. Curriculum Técnico Modular (10 Sesiones)

Módulo 1: Diagnóstico Participativo Integrado (Sesiones 1-2) La evaluación incluye fertilidad del suelo mediante técnicas campesinas tradicionales y análisis científicos, mapeo participativo de recursos hídricos y microclimas, inventario de especies vegetales nativas con potencial forrajero, análisis de condición corporal del ganado, y evaluación socioeconómica de estructura familiar y capacidad de inversión.

Módulo 2: Diseño Predial SSPi Participativo (Sesión 3) El diseño contempla trazado de divisiones forrajeras basado en topografía y disponibilidad de agua, selección participativa de especies arbóreas según usos múltiples, diseño del sistema hídrico con captación de lluvia y reservorios, planificación de infraestructura, y elaboración de cronograma de establecimiento escalonado de 3-5 años.

Módulo 3: Establecimiento Técnico (Sesiones 4-5) Incluye preparación de sitio con técnicas de mínima labranza, densidades diferenciadas de 40,000-53,000 plantas Leucaena/ha, arreglos espaciales en franjas y bloques, manejo inicial con podas y control de malezas, e integración de especies nativas según tradición maya local.

Módulo 4: Biofábricas Prediales (Sesión 6) Comprende captura de microorganismos nativos de ecosistemas conservados, multiplicación en fermentadores artesanales, producción de biofertilizantes líquidos y sólidos, aplicación estratégica según fenología, y monitoreo de calidad con parámetros de pH y población microbiana.

Módulo 5: Pastoreo Racional Adaptativo (Sesión 7) Basado en principios Voisin tropicalizados incluye ley del reposo según especie forrajera y época, ley de ocupación con densidad animal óptima, ley del rendimiento máximo según estado fenológico, ley del rendimiento regular con planificación estacional, y adaptación diferenciada época seca/lluviosa.

15.2. Marco Metodológico TNC-UADY para Innovación Ganadera

El modelo de innovación desarrollado por The Nature Conservancy (TNC) en colaboración con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) establece un marco conceptual integrativo para la adopción masiva de sistemas silvopastoriles, fundamentado en la teoría de sistemas socio-ecológicos complejos. Este enfoque reconoce que la transformación de la ganadería tropical trasciende la mera transferencia tecnológica, requiriendo la construcción de redes de aprendizaje social que integren conocimiento tradicional maya, ciencia agroecológica contemporánea, y dinámicas de mercado.

15.2.1. Principios Rectores del Modelo

Los principios incluyen co-innovación multi-actor con productores, investigadores y técnicos como co-diseñadores; aprendizaje social adaptativo mediante construcción colectiva de conocimiento; escalamiento horizontal por difusión campesino-a-campesino basada en redes de confianza; e institucionalización progresiva mediante incorporación gradual en políticas públicas y marcos normativos.

15.2.2. Metodología Adaptada Colombia-México

La experiencia colombiana en sistemas silvopastoriles (CIPAV, CIAT, 1995-2020) aporta metodologías andragógicas validadas para educación de adultos rurales que incluyen diagnóstico rural participativo con mapeo de activos y análisis de problemas desde la experiencia acumulada; parcelas de aprendizaje con módulos demostrativos en predios líderes donde adultos aprenden haciendo; intercambios horizontales mediante giras técnicas y pasantías entre productores experimentados; y sistematización participativa con documentación colectiva de lecciones aprendidas por adultos en contextos reales.

15.3. Especies Arbóreas Forrajeras Validadas

Los estándares técnicos del proyecto establecen especies nativas prioritarias validadas por UADY-INIFAP para condiciones yucatecas:

Nombre Maya	Nombre Científico	Uso Principal	Densidad/ha
Ja'abin	<i>Piscidia piscipula</i>	Forraje + captura C	200-300
Pixoy	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Forraje + sombra	150-250
Ramón	<i>Brosimum alicastrum</i>	Forraje emergencia + fruto	100-150
K'atsin	<i>Mimosa bahamensis</i>	Forraje leguminosa	300-400
Chakaj	<i>Bursera simaruba</i>	Sombra + medicinal	50-100
Chukum	<i>Haematoxylum campechianum</i>	Construcción + forraje	100-200
Kitinché	<i>Caesalpinia gaumeri</i>	Cerco vivo + forraje	500-800
Tzalam	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Madera + forraje	80-120
Yaaxnik	<i>Vitex gaumeri</i>	Melífera + forraje	100-150
Chechem	<i>Metopium brownei</i>	Construcción + sombra	50-80

Tabla 52: Especies nativas forrajeras prioritarias validadas UADY-INIFAP

15.4. Protocolos de Biofábricas Prediales

15.4.1. Marco Conceptual de Bioeconomía Circular

Las biofábricas prediales representan un enfoque de bioeconomía circular que integra principios de agroecología, microbiología del suelo y gestión sustentable de recursos. Este sistema transforma residuos orgánicos del sistema ganadero en bioinsumos de alto valor nutricional, reduciendo la dependencia de agroquímicos externos mientras optimiza los ciclos biogeoquímicos a nivel predial.

15.4.2. Fundamento Agroecológico

Los microorganismos benéficos nativos de ecosistemas forestales conservados poseen capacidades funcionales documentadas que incluyen solubilización de fósforo mediante cepas especializadas de *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens*; fijación biológica de nitrógeno por bacterias diazotróficas como *Azospirillum brasiliense* y *Azotobacter chroococcum*; promoción de crecimiento vegetal mediante síntesis de reguladores hormonales; biocontrol de fitopatógenos por múltiples mecanismos de antagonismo; mejoramiento de estructura del suelo mediante polisacáridos extracelulares; y aceleración de procesos de descomposición de materiales orgánicos.

15.4.3. Protocolos Técnicos Detallados

Protocolo 1: Captura de Microorganismos Nativos La captura incluye selección de zonas forestales conservadas en radio de 5-10 km, muestreo estratificado de capa superficial 5-15 cm, verificación de parámetros de calidad (temperatura 22-28°C, pH 6.0-7.5), recolección de 10 kg por cada 200 litros de sustrato, y conservación temporal en refrigeración máximo 48 horas.

Protocolo 2: Activación y Multiplicación El proceso contempla preparación de medio base con 180L agua no clorada, 10 kg suelo nativo tamizado, 9L melaza al 5

Protocolo 3: Producción de Biofertilizante Líquido La formulación técnica incluye 50L caldo microbiano concentrado, 100L estiércol bovino fresco licuado, 20L melaza, 830L agua no clorada, 500g sulfato de magnesio, y 200g fosfato diamónico. El proceso requiere 21 días de fermentación con aireación controlada, homogenización periódica, y control de pH 6.0-6.8 para obtener 900-950L de producto final.

15.4.4. Infraestructura Mínima Requerida

La biofábrica predial requiere área techada de 12 m², 4 tambos plásticos 200L con tapa hermética, 2 contenedores aireación 500L, termómetro de compost, balanza 20 kg, bomba aspersora manual 20L, y kit medición pH. La inversión total es de \$18,000 MXN con retorno de inversión en 8 meses por ahorro en fertilizantes químicos de \$33,000 anuales.

15.4.5. Aplicación Técnica y Dosis

Los estándares técnicos establecen dilución 1:10 para aplicación foliar, dosis 100-200 L/ha según estado fenológico, frecuencia quincenal en época lluviosa y mensual en seca, aplicación en primeras horas matutinas (6:00-9:00 AM) o vespertinas (5:00-7:00 PM) para evitar radiación solar directa que reduce viabilidad microbiana.

15.5. Factores Críticos para Adopción Masiva de SSPi

15.5.1. Lecciones de Experiencias Latinoamericanas

El análisis de proyectos SSPi implementados en América Latina (1995-2020) identifica factores críticos para el éxito. La continuidad institucional requiere estructura operativa estable durante 8-15 años mínimo, trascendiendo ciclos políticos. La intensidad de asistencia técnica demanda ratios técnico-productor 1:25-30 con visitas quincenales en establecimiento y mensuales en consolidación.

La barrera económica inicial se supera con subsidios del 60-70

La transformación cultural implica superar el paternalismo institucional, desarrollando apropiación tecnológica genuina mediante metodologías campesino-a-campesino, capacidades de gestión empresarial, y construcción gradual de autonomía técnica. La integración del conocimiento tradicional maya con validación científica requiere metodologías de diálogo de saberes que reconozcan la legitimidad tanto del conocimiento campesino como científico.

15.5.2. Transición de Proyectos Piloto a Políticas Masivas

Los casos exitosos (Costa Rica, Colombia, Brasil) lograron esta transición mediante articulación de evidencia científica con demandas sociales organizadas, construcción de coaliciones amplias incluyendo sector productivo y academia, diseño de instrumentos flexibles

adaptados a diversidades regionales, y formación de capacidades institucionales para implementación a gran escala.

El Macroproyecto Renacimiento Ganadero Maya incorpora estas lecciones mediante continuidad institucional de 10 años, presupuesto robusto de \$926.5 millones MXN, metodología ECA validada, y articulación federal-estatal-productores con marco normativo específico que garantiza sostenibilidad institucional y apropiación tecnológica masiva.

16. Marco Institucional y Coordinación

16.1. Estructura Operativa Integrada

16.1.1. Coordinación General

SADER Yucatán - Jefatura de Programa Pecuario Sustentable:

- **Jefe de Programa:** Coordinación estratégica general
- **Zootecnista SSPi Senior:** Componente silvopastoril
- **Especialista Mejoramiento Genético:** Centro Tizimín
- **Coordinador Desarrollo Lechero:** Componente lácteo
- **Especialista Sanidad Animal:** TBC + Mosca estéril
- **Analista Financiero:** Seguimiento presupuestal
- **Especialista Monitoreo:** Indicadores de impacto
- **Administrador FOFAY:** Gestión fiduciaria

16.2. Alianzas Estratégicas Técnicas

16.2.1. Instituciones de Investigación

Institución	Contribución Técnica
UADY	Investigación SSPi, validación agronómica, transferencia tecnológica
TNC	Metodologías ambientales, monitoreo carbono, certificación sostenibilidad
INIFAP	Validación variedades forrajeras, protocolos técnicos, capacitación
FIRA	Esquemas crediticios, análisis de riesgo, seguros paramétricos
SENASICA	Protocolos sanitarios, certificación TBC, coordinación binacional
APHIS-USDA	Certificación exportación, protocolos digitales, supervisión técnica

Tabla 53: Red Institucional de Soporte Técnico

17. Análisis de Impacto Social y Equidad

17.1. Beneficiarios Directos y Estructura Demográfica

17.1.1. Universo de Beneficiarios por Componente

Componente	UPP Benef.	Hombres (%)	Mujeres (%)	Jóvenes (%)	Total Personas
SSPi + Repoblamiento	1,075	695 (64.7 %)	380 (35.3 %)	215 (20.0 %)	2,150
Desarrollo Lechero	75	45 (60.0 %)	30 (40.0 %)	18 (24.0 %)	150
Meliponicultura Maya	50 UPP (500 prod.)	150 (30.0 %)	350 (70.0 %)	115 (23.0 %)	500
Centro Genético	880 UPP (servicios)	572 (65.0 %)	308 (35.0 %)	176 (20.0 %)	1,760
Plataforma Digital	1,320 UPP (usuarios)	858 (65.0 %)	462 (35.0 %)	264 (20.0 %)	2,640
TOTAL	1,320 UPP únicas	1,518 (66.5 %)	822 (33.5 %)	424 (21.2 %)	3,200 beneficiarios

Tabla 54: Estructura Demográfica de Beneficiarios por Componente

17.1.2. Análisis de Equidad de Género

Meta de participación femenina superada: Con 33.5 % de beneficiarias mujeres, el macroproyecto supera la meta mínima establecida del 30 % en políticas públicas de inclusión social. Esta participación se distribuye estratégicamente:

- **Meliponicultura (70 % mujeres):** Reconoce el liderazgo femenino tradicional en la cultura apícola maya
- **Lechería tropical (40 % mujeres):** Aprovecha la participación histórica de mujeres en sistemas de traspatio
- **Sistemas silvopastoriles (35.3 % mujeres):** Incorpora mujeres en actividades tradicionalmente masculinas
- **Capacitación diferenciada:** Programas específicos de formación técnica en idioma maya para mujeres

17.2. Inclusión de Pueblos Indígenas Maya

17.2.1. Pertinencia Cultural y Conocimientos Tradicionales

El macroproyecto incorpora sistemáticamente los conocimientos tradicionales mayas en el diseño técnico de los componentes, reconociendo el valor de la sabiduría ancestral para la agricultura sustentable:

Conocimiento Tradicional Maya	Aplicación Moderna	Integración Técnica en Componentes
Manejo agroforestal	Sistemas silvopastoriles (SSPi)	Árboles nativos: Ramón, Pixoy, Ja'abin en diseño SSPi
Meliponicultura	Abejas sin aguijón (<i>Melipona beecheii</i>)	Técnicas tradicionales + tecnificación moderna para 6 ton/año
Medicina veterinaria	Fitoterapia animal tradicional	Plantas medicinales en protocolos sanitarios preventivos
Calendario agrícola	Cronograma siembra maya	Sincronización con ciclos climáticos tradicionales
Sistemas de policultivo	Diversificación	Integración cultivos complementarios en sistemas silvopastoriles

Tabla 55: Integración de Conocimientos Tradicionales Maya en Componentes Técnicos

17.2.2. Fortalecimiento de la Identidad Cultural

Estrategia de marca territorial "Maya Sustentable": El macroproyecto desarrolla una estrategia de diferenciación comercial basada en la identidad cultural maya que agrega valor comercial a los productos:

- **Certificación de origen maya:** Sello de calidad para productos silvopastoriles

- **Miel de abejas sin aguijón certificada:** Producto premium con identidad cultural
- **Carne de sistemas agroforestales mayas:** Diferenciación en mercados especializados
- **Capacitación bilingüe:** Programas técnicos en español y maya yucateco

17.3. Generación de Empleos y Desarrollo Económico Local

17.3.1. Empleos Directos e Indirectos

Tipo de Empleo	2026	2027	2028	2029	2030
Empleos directos	1,050	1,800	2,550	3,300	4,050
Operarios SSPi	600	1,200	1,800	2,400	3,000
Técnicos especializados	150	250	350	450	550
Personal centro genético	50	75	100	125	150
Operadores lechería	250	275	300	325	350
Empleos indirectos	1,050	1,800	2,550	3,300	4,050
Transporte y logística	315	540	765	990	1,215
Comercialización	210	360	510	660	810
Servicios profesionales	105	180	255	330	405
Insumos y materiales	420	720	1,020	1,320	1,620
TOTAL EMPLEOS	2,100	3,600	5,100	6,600	8,100

Tabla 56: Proyección Quinquenal de Generación de Empleos

Multiplicador de empleo calculado: 2.5 empleos indirectos por cada empleo directo creado, basado en estudios de impacto económico del sector agropecuario en México (CEPAL, 2023).

17.3.2. Impacto en el Desarrollo Rural

Reversión del proceso migratorio: El macroproyecto genera oportunidades de empleo calificado en el medio rural que contribuyen a retener población joven y reversar los procesos migratorios hacia centros urbanos:

- **Empleos calificados:** 550 técnicos especializados al final del quinquenio
- **Oportunidades para jóvenes:** 21.2 % de beneficiarios menores de 35 años
- **Desarrollo de capacidades:** 3,200 personas capacitadas en tecnologías avanzadas

- **Encadenamientos productivos:** Fortalecimiento de 15 empresas locales proveedoras

17.4. Impacto en Indicadores Sociales

17.4.1. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

ODS	Meta Específica	Contribución del Macroproyecto
1	Erradicación pobreza	8,100 empleos + incremento 280 % ingresos rurales
2	Hambre cero	+100% producción alimentos origen animal
5	Igualdad género	33.5 % beneficiarias mujeres + liderazgo meliponicultura
8	Trabajo decente	Empleos formales + capacitación técnica especializada
10	Reducir desigualdades	Inclusión pueblos indígenas + pequeños productores
13	Acción climática	765,000 ton CO ₂ eq captura + -50 % emisiones GEI
15	Vida ecosistemas	Restauración 6,000 ha + +400 % biodiversidad

Tabla 57: Contribución del Macroproyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

17.4.2. Indicadores de Impacto Social Verificables

Sistema de monitoreo social integrado: El macroproyecto establece un sistema de indicadores sociales verificables que permite el seguimiento cuantitativo del impacto en las comunidades beneficiarias:

- **Ingreso familiar promedio:** Incremento de \$8,400 anuales por familia beneficiaria
- **Índice de marginación:** Reducción promedio de 0.8 puntos en escala CONAPO
- **Acceso a servicios financieros:** 85 % de beneficiarios con acceso a crédito formal
- **Capacitación técnica:** 100 % de beneficiarios certificados en al menos una especialidad
- **Organización productiva:** Fortalecimiento de 45 organizaciones de productores

18. Conclusiones y Recomendaciones Técnicas

18.1. Síntesis de Viabilidad Integral

La presente Base Técnica Integral demuestra la **viabilidad científica, técnica y económica** del Macroproyecto Renacimiento Ganadero Maya mediante la integración coherente de

seis componentes estratégicos respaldados por:

1. **Rigor científico validado:** Todos los parámetros técnicos están respaldados por investigación INIFAP, UADY y organismos internacionales
2. **Coherencia territorial:** Focalización Pareto maximiza eficiencia de recursos públicos
3. **Viabilidad económica:** Modelos financieros con capacidades de pago crediticio validadas
4. **Sostenibilidad ambiental:** Captura masiva de carbono y reducción significativa de GEI
5. **Integración sistémica:** Sinergia entre componentes multiplica impactos individuales

18.2. Principios Críticos para el Éxito

18.2.1. Secuencia de Implementación Inviolable

ORDEN CRÍTICO: Infraestructura → Establecimiento → Maduración (6-9 meses) → Ganado

La **disciplina en la ejecución secuencial** es más determinante para el éxito que la calidad del diseño. Invertir este orden resultaría en fracaso operativo garantizado.

18.2.2. Sincronización Técnica Obligatoria

- **Leucaena:** Mínimo 6-9 meses de maduración antes de pastoreo
- **Carga animal:** Introducción gradual hasta alcanzar 3.5 UA/ha óptimas
- **Capacitación:** Previa a cada entrega de vaquillas y establecimiento SSPi
- **Monitoreo:** Evaluación mensual de adopción tecnológica y productividad

18.3. Recomendaciones Estratégicas

18.3.1. Para la Fase de Implementación

1. **Priorizar calidad sobre velocidad** en el establecimiento de SSPi
2. **Implementar sistema de monitoreo georreferenciado** desde el inicio
3. **Mantener flexibilidad adaptativa** basada en resultados de evaluación
4. **Fortalecer capacidades técnicas locales** mediante ECAs intensivas
5. **Documentar sistemáticamente** lecciones aprendidas para replicabilidad

18.3.2. Para la Sostenibilidad Post-Proyecto

1. **Consolidar mercados** para productos diferenciados (carne/leche sostenible)
2. **Establecer sistema de certificación** de carbono para monetización
3. **Crear red de productores SSPi** para transferencia horizontal
4. **Mantener alianzas estratégicas** UADY-TNC para investigación continua
5. **Escalar modelo** a estados vecinos (Campeche, Quintana Roo)

18.4. Declaración de Viabilidad Técnica

Esta Base Técnica Integral certifica que el Macroproyecto Renacimiento Ganadero Maya 2026-2030 es:

- **TÉCNICAMENTE FACTIBLE** con las metodologías y recursos especificados
- **ECONÓMICAMENTE VIABLE** con ratios de capacidad de pago validados
- **AMBIENTALMENTE BENÉFICO** con impactos cuantificados de captura de carbono
- **SOCIALMENTE INCLUSIVO** con participación de pequeños productores maya
- **INSTITUCIONALMENTE SOSTENIBLE** con marco de coordinación robusto

La viabilidad integral está condicionada al cumplimiento estricto de los protocolos técnicos, secuencias de implementación y marcos de coordinación institucional especificados en este documento.

19. Referencias Técnicas y Bibliografía

1. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *Inventario Ganadero Nacional - Yucatán*. SADER.
2. Padrón Ganadero Nacional. (2025). *Concentración Regional por Organizaciones Ganaderas - Yucatán*. SENASICA.
3. Fundación Produce Michoacán A.C. (2010-2020). *Validación de Sistemas Silvopastoriles con Leucaena leucocephala*. Investigación aplicada.
4. Universidad Autónoma de Yucatán - Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. (2018-2023). *Evaluación de Sistemas Agroforestales Tropicales*. Proyecto de investigación.
5. The Nature Conservancy México. (2019-2024). *Captura de Carbono en Sistemas Silvopastoriles Intensivos*. Programa Ganadería Sostenible.

6. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2020-2024). *Validación Agronómica Leucaena leucocephala en Suelos Kársticos*. Campo Experimental Mocochá.

20. Anexos Técnicos

20.1. Anexo I: Memorias de Cálculo Detalladas

Remisión: Las memorias de cálculo completas para densidades de siembra, costos unitarios, y proyecciones financieras se encuentran en los documentos técnicos source:

- MEMORIA_CALCULO_PAQUETE_TECNOLOGICO_SSPi.tex
- RECALCULO_MACROPROYECTO_BECERROS_YUCATAN.tex
- Calculo_Carga_Animal_Yucatan_SIAP.tex

20.2. Anexo II: Especificaciones Técnicas por Componente

Remisión: Las especificaciones técnicas detalladas por componente se encuentran en:

- REVISED_Proyecto_Silvopastoril_Realista.tex
- REVISED_Proyecto_Lechero_Conservador.tex
- ANEXO_TECNICO_SILVOPASTORIL.tex

20.3. Anexo III: Análisis Territorial Pareto

Remisión: El análisis completo de concentración territorial se encuentra en:

- Analisis_Pareto_Ganadero_Yucatan.tex

BASE TÉCNICA INTEGRAL CERTIFICADA

Documento de referencia técnica consolidado para el
Macroproyecto Estratégico Renacimiento Ganadero Maya 2026-2030

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
Diciembre 2025