

LA LECHE DEL PÁRAMO

**CLIMA, NUTRIENTES DEL SUELO Y ECONOMÍA
GANADERA EN LOS SISTEMAS DE ALTURA DEL
CARCHI, ECUADOR**



Gladys Primavera Urgilés Urgilés
Luis Alfredo Carvajal Pérez
Fausto Guillermo Montenegro Arellano
Anibal Eduardo Herrera Lana
Pablo David Quishpe Sinalin

ISBN: 978-9907-818-46-8





LA LECHE DEL PÁRAMO

**Clima, Nutrientes del Suelo y Economía Ganadera en los Sistemas de Altura del Carchi,
Ecuador**

Autores:

Gladys Primavera Urgilés Urgilés

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5125-8752>

Correo electrónico institucional: gladys.urgiles@upec.edu.ec

Filiación institucional: Universidad Politécnica Estatal del Carchi

Luis Alfredo Carvajal Pérez

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3039-7657>

Correo electrónico institucional: luis.carvajal@upec.edu.ec

Filiación institucional: Universidad Politécnica Estatal del Carchi

Nombres y apellidos completos: Guillermo Fausto Montenegro Arellano

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0126-0704>

Correo electrónico institucional: guillermo.montenegro@upec.edu.ec

Filiación institucional: Universidad Politécnica Estatal del Carchi

Nombres y apellidos completos: Aníbal Eduardo Herrera Lana

Código ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2549-7449>

Correo electrónico institucional: eduardo@cydhem.com

Filiación institucional: Instituto de Investigaciones Económicas de la Universidad Central del Ecuador.

Nombres y apellidos completos: Pablo David Quishpe Sinailin

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8008-1995>

Correo electrónico institucional: pdquishpe@uce.edu.ec

Filiación institucional: Universidad Central del Ecuador

Editorial “ACACFESA SAS”

La presente obra fue revisada por 2 pares académicos externos ciegos conforme al proceso editorial de ACACFESA SAS.

Los rigurosos procedimientos editoriales de ACACFESA SAS garantizan la selección de manuscritos por sus aportes significativos al conocimiento y cualidades científicas.

Editorial: ACACFESA SAS.

Sello editorial: 978-9907-818

Teléfono: (+593) 998955446

Web: <https://acacfesa.com/editorial/index.php/1>

ISBN: 978-9907-818-46-8

Doi: <https://doi.org/10.70577/m24jq415/ACACFESA.EDITORIAL>

Año: Septiembre - 2026

Aviso Legal

El contenido de esta obra, que incluye ilustraciones, textos, tablas, gráficos, cuadros y referencias bibliográficas, es responsabilidad única del autor o autores. Lo que se ha dicho, los criterios y los datos no reflejan necesariamente la posición institucional ni el pensamiento de la Editorial ACACFESA SAS.

Derechos de Autor ©

Este documento se publica conforme los términos y condiciones de la EDITORIAL ACACFESA SAS

Esta obra está bajo una licencia internacional



Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0

La "Editorial ACACFESA SAS " y todos sus autores tienen la propiedad única de los derechos de autor y de propiedad intelectual e industrial relacionados con el contenido de esta publicación. La reproducción total o parcial de esta obra, su almacenamiento en sistemas informáticos, su tratamiento digital y cualquier tipo de distribución, transmisión o comunicación pública por medios electrónicos, ópticos, mecánicos, químicos, fotográficos o de grabación están prohibidos. Esto se encuentra bajo las sanciones que establece la legislación vigente a menos que se cuente con la autorización previa y por escrito de los titulares del copyright.

Queda excluido únicamente el uso con fines académicos o de investigación científica, siempre que no busque objetivos comerciales y se ejecute sin remuneración, debiendo mencionarse en todo momento a la fuente editorial correspondiente. Los autores son los únicos responsables de las opiniones expresadas en los diferentes capítulos, las cuales no necesariamente representan el punto de vista institucional de la editorial.

Constancia de Arbitraje

La Editorial ACACFESA SAS, certifica que este libro es el resultado de un estudio llevado a cabo por los autores, el cual fue evaluado por jurados expertos bajo el sistema de Pares Externos, tanto en contenido como en forma. Asimismo, se llevó a cabo un análisis del método de investigación, paradigma y enfoque; a partir de la matriz epistémica adoptada por los autores, utilizando las normas APA, Séptima Edición y el proceso de antiplagio en línea turniting para asegurar que la obra fuera científica.

Revisor par externo 1

Liliana Patricia Acurio Arcos

Revisor par externo 2

Francel Xavier López Mejía

PROLOGO

La producción de leche en los sistemas ganaderos de tierras altas en Carchi tiene una estrecha relación con las condiciones ambientales, productivas y económicas de la zona. En estos sistemas, el clima, las condiciones del suelo y la disponibilidad de nutrientes afectan la producción de biomasa, la alimentación, la producción de leche y la rentabilidad de las fincas.

La Leche de la Llanura: Clima, nutrientes del suelo y economía pecuaria presenta una visión integradora del clima, nutrientes del suelo, la ganadería y sus dimensiones económicas correspondientes. Este estudio es distinto en la forma en que aborda las dimensiones de clima, suelo, producción y economía para explicar el potencial de los sistemas ganaderos de las tierras altas para adaptarse y responder a los cambios en el entorno. Esta visión incorpora el suelo en la relación entre clima y producción.

El trabajo es aplicable al ámbito académico-científico y agrícola porque contiene componentes que son útiles para investigadores, docentes, estudiantes, técnicos, productores y quienes planifican la agricultura. Es posible analizar la ganadería de alta montaña en términos de productividad y sostenibilidad ambiental, así como la economía de quienes realizan esta actividad.

Más allá de su valor científico, este libro invita a comprender una realidad importante: cada litro de leche producido en altas altitudes es resultado del clima, del suelo, de los nutrientes, de los pastos, de los animales, de los productores y del territorio. Analizar estas relaciones es fundamental para hacer que los sistemas ganaderos sean más sostenibles y resilientes para enfrentar los desafíos ambientales y productivos presentes y futuros.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PROLOGO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 La Ganadería de Altura del Carchi: Territorio, Sistemas Productivos y Problemática.....	3
1.1 Introducción: El Páramo que Produce	5
1.2 Caracterización Geográfica y Agroecológica del Corredor Ganadero del Carchi	6
1.2.1 Ubicación y Contexto Regional.....	6
1.2.2 Zonificación Agroecológica del Corredor Ganadero	6
1.2.3 Los Suelos del Corredor Ganadero: Una Herencia Volcánica	7
1.3 Importancia Económica del Sector Ganadero en el Carchi	8
1.3.1 El Peso del Sector Ganadero en la Economía Provincial	8
1.3.2 La Cadena de Valor del Sector Lechero Carchense	9
1.4 Tipología de los Sistemas Ganaderos de Altura del Carchi	10
1.4.1 El Sistema Tipo I como Caso Crítico	12
1.5 Diagnóstico de la Problemática: La Triple Crisis del Corredor Ganadero de Altura.....	13
1.5.1 La Crisis Climática: Una Variabilidad que Crece	13
1.5.2 La Crisis Edáfica: Suelos Bajo Presión	14
1.5.3 La Crisis Económica: Márgenes que se Estrechan	15
1.6 Posicionamiento del Proyecto en la Literatura y la Política Agropecuaria.....	17
1.6.1 El Vacío de Investigación Integrada en los Andes Ecuatorianos	17
1.6.2 Relevancia para la Política de Adaptación al Cambio Climático	17
1.7 Preguntas de Investigación, Hipótesis y Objetivos del Proyecto.....	18
1.7.1 La Pregunta Central.....	18
1.7.2 El Diseño Metodológico Integrado	19
1.8 El Corredor Ganadero del Carchi como Laboratorio de la Adaptación Andina	20
1.9 Síntesis del capítulo	21
2.1 Introducción: El Clima como Regulador del Ecosistema Ganadero	24
2.2 El Clima Andino de Altura: Variables, Rangos Óptimos y Umbrales Críticos.....	25
2.2.1 La Especificidad del Clima Tropical de Altura	25

2.2.2 Las Siete Variables Climáticas Críticas y sus Umbrales	26
2.2.3 La Temperatura del Suelo como Variable Mediadora	28
2.3 Ciclos Biogeoquímicos de Nutrientes y su Sensibilidad a los Factores Climáticos	29
2.3.1 Los Andisoles como Matriz Biogeoquímica	29
2.3.2 El Nitrógeno como el Nutriente de Mayor Relevancia Productiva	31
2.3.3 La Paradoja del Fósforo en los Andisoles	32
2.4 Variabilidad	32
2.4.1 Definiciones Operativas.....	32
2.5 El Fenómeno ENSO y su Expresión en el Corredor Ganadero del Carchi.....	33
2.5.1 El ENSO como Modulador Dominante de la Variabilidad Interanual.....	33
2.5.2 La Huella del ENSO en la Producción de Leche del Carchi	35
2.6 El Estrés Térmico en Bovinos de Altura: El Índice THI.....	36
2.6.1 El Confort Térmico como Variable Mediadora entre el Clima y la Producción de Leche	36
2.6.2 El THI en el Contexto de Altura del Carchi	37
2.7 La Cadena Causal Integrada: Clima → Suelo → Biomasa → Leche → Economía	38
2.7.1 El Modelo Conceptual del Proyecto.....	38
2.7.2 La Propiedad Emergente de la Cadena: La Amplificación del Impacto	40
2.8 La Productividad Primaria Neta Aérea como Variable Central	41
2.8.1 Definición y Determinantes de la PPNA en Pastizales de Altura	41
2.8.2 La Relación PPNA–Precipitación en Pastizales Andinos	41
2.9.1 El Suelo como Capital Natural	42
2.9.2 La Variabilidad Climática como Perturbación del Capital Natural.....	42
2.10 Los Marcos Teóricos de Referencia del Proyecto.....	43
2.11 Síntesis del capítulo	45
CAPÍTULO 3 Estado del Arte: Revisión Sistemática de la Literatura	47
3.1 Introducción: Por qué una Revisión Sistemática y no una Revisión Narrativa	48
3.2 Protocolo de la Revisión Sistemática.....	49
3.2.1 Resultados del Proceso de Selección.....	51
3.3 Clima y Nutrientes del Suelo en los Andes Tropicales: Síntesis de la Evidencia.....	51
3.3.1 El Consenso sobre la Sensibilidad Climática de los Andisoles	51
3.3.2 Vacíos en la Evidencia sobre Clima y Suelo	54
3.4 Producción de Biomasa, Producción de Leche y Variabilidad Climática: La Evidencia Cuantitativa.....	55
3.4.1 La Relación Altitud–Biomasa en los Andes Ecuatorianos	55
3.4.2 La Señal ENSO en la Producción de Leche: Evidencia Cuantitativa.....	58

3.5 El Impacto Económico de la Variabilidad Climática: Estado del Conocimiento	59
3.5.2 El Costo de la No Adaptación: Una Brecha Crítica	61
3.6 Estudios Específicos del Corredor Carchi–Nariño: Lo que se Sabe y lo que Falta	62
3.6.1 La Investigación Disponible para el Corredor	62
3.6.2 La Tesis Doctoral de Recalde-Yáñez (2019) como Punto de Partida	63
3.7 Comparación con Otros Corredores Ganaderos Andinos	64
3.7.1 El Altiplano Nariñense como Espejo Binacional	64
3.7.2 El Altiplano Cundiboyacense: El Sistema de Mayor Productividad de los Andes	64
3.7.3 Los Andes Peruanos y Bolivianos: Lecciones desde la Variabilidad Extrema	64
3.8 Las Cinco Brechas de la Literatura y el Posicionamiento del Proyecto	65
3.8.1 La Jerarquía de las Brechas	67
3.9 Síntesis Cuantitativa: Los Parámetros de la Literatura para la Calibración de los Modelos	68
3.9.1 Parámetros Biofísicos de Referencia	68
3.9.2 Los Parámetros que la Literatura no Puede Proveer	68
3.10 Síntesis del capítulo:	69
CAPÍTULO 4 Caracterización Climática del Corredor Ganadero de Altura del Carchi (2000–2024)	71
4.1 Introducción: El Clima como Dato, no solo como Contexto	72
4.2 Fuentes de Datos Climáticos y Control de Calidad	73
4.2.1 La Red de Estaciones Meteorológicas del INAMHI en el Carchi	73
4.2.2 Protocolo de Control de Calidad y Relleno de Datos	74
4.3 Temperatura: Tendencias, Variabilidad Estacional e Interanual	75
4.3.1 La Estructura Térmica del Corredor	75
4.3.2 La Paradoja del Calentamiento con Más Heladas	76
4.4 Precipitación: Distribución, Variabilidad y Señal ENSO	77
4.4.1 El Régimen Bimodal y su Distribución Altitudinal	77
4.4.2 La Alta Variabilidad Interanual como el Riesgo Climático Dominante	78
4.5 Eventos Climáticos Extremos: El Catálogo del Corredor 2000–2024	79
4.5.1 La Asimetría del Impacto: El Niño vs. La Niña	81
4.6 Radiación Solar, Evapotranspiración y Balance Hídrico	82
4.6.1 La Radiación Solar como Factor Limitante en Períodos de Alta Nubosidad	82
4.6.2 El Balance Hídrico del Corredor	82
4.7 Índices Climáticos para la Producción Ganadera del Corredor	83
4.7.1 El SPI-3 como Predictor de la Disponibilidad de Nutrientes del Suelo	85

4.8 El Corredor del Carchi en el Contexto del Cambio Climático: Proyecciones al 2035 y 2050.....	86
4.8.1 Metodología de las Proyecciones	86
4.8.2 Las Implicaciones de las Proyecciones para el Diseño de la Adaptación	88
4.9 Síntesis del capítulo	88
CAPÍTULO 5 Propiedades del Suelo y Diagnóstico Edáfico del Corredor Ganadero del Carchi	91
5.1 Introducción: El Suelo como la Caja Negra de la Cadena Causal	92
5.2 Diseño del Muestreo Edáfico: Estratificación, Protocolo y UPAs Centinela	93
5.2.1 Principios del Diseño	93
5.2.2 Las UPAs Centinela como el Corazón Analítico del Proyecto	95
5.3 Propiedades Físicas y Químicas Basales: La Huella del Gradiente Altitudinal y el Manejo	96
5.3.1 Los Andisoles del Corredor: Un Perfil Edáfico Singular	96
5.3.2 El Gradiente Materia Orgánica–Altitud y sus Consecuencias	98
5.4 Estado Nutricional del Suelo: Disponibilidad de Nutrientes y Brechas de Suficiencia	99
5.4.1 La Deficiencia de Fósforo: El Problema Nutricional Estructural del Corredor	101
5.4.2 La Deficiencia de Magnesio: El Problema Oculto	101
5.5 Microbiología del Suelo y Actividad Enzimática: La Interfaz Clima–Nutrientes	102
5.5.1 La Paradoja de la Alta Biomasa Microbiana en el Páramo	104
5.5.2 La Variación Estacional del N Mineral como Indicador Clave.....	105
5.6 Diagnóstico Integrado de Limitaciones Edáficas del Corredor	106
5.6.1 La Jerarquía de Limitaciones por Tipo de Sistema	108
5.7 El Suelo como Amplificador o Amortiguador del Impacto Climático	109
5.7.1 La Función Amortiguadora del Suelo de Buena Calidad	109
5.7.2 La Implicación para la Cuantificación del Impacto Climático	110
5.8 Comparación con los Valores de Referencia de la Literatura y con el Altiplano Nariñense	110
5.8.1 Contexto Andino Regional	110
5.8.2 Lo que el Corredor del Carchi Tiene que el Altiplano Nariñense no Tiene	111
5.9 Síntesis del capítulo:	111
CAPÍTULO 6 Relación entre Factores Climáticos y Dinámica de Nutrientes del Suelo	113
6.1 Introducción: De la Correlación a la Cuantificación Causal	114

El Capítulo 5 trataba del estado en el que se encuentra el suelo en el corredor, haciendo énfasis en conocer de qué manera el estado físico, químico y microbiológico del suelo influirá en su capacidad de producción y su sensibilidad frente a los cambios climáticos. En

este capítulo se da un paso hacia un aspecto importante del proyecto: relacionar y cuantificar la variabilidad de las variables climáticas (temperatura del suelo, humedad del suelo, fenómeno ENSO) y la dinámica de los nutrientes del suelo (nitrógeno mineral, fósforo disponible y potasio intercambiable), importantes para el crecimiento del pastizal y de los animales de ganado.	114
6.2 Temperatura del Suelo y Disponibilidad de Nitrógeno Mineral: Los Modelos de Regresión	115
6.2.1 El Modelo Central y sus Supuestos.....	115
6.2.2 El Gradiente del Coeficiente β_1 como Confirmación de la Hipótesis H1	117
6.3 Lluvia, Lixiviación y Potasio: El Nutriente más Reactivo a la Precipitación.....	118
6.3.1 El Efecto Birch: Un Mecanismo de Recuperación Parcial.....	120
6.4 Análisis de Series de Tiempo: La Señal del ENSO en los Nutrientes del Suelo	121
6.4.1 El Rezago Diferencial como Indicador de la Velocidad de Respuesta del Ciclo de cada Nutriente.....	123
6.5 Cuantificación Integrada del Impacto del ENSO sobre los Nutrientes del Suelo	124
6.5.1 La Asimetría N-K en la Respuesta al ENSO	126
6.6 Los Modelos Estadísticos de la Cadena Clima–Suelo	127
6.6.1 La No Linealidad como Hallazgo Original.....	129
6.7 La Hipótesis H1 Confirmada: Síntesis de los Resultados.....	129
6.8 Implicaciones para los Capítulos 7–9 y para la Política Agropecuaria.....	130
6.8.1 Los Coeficientes como Insumos para la Cadena Causal.....	130
6.8.2 El Umbral SPI-3 = -1,0 como Herramienta de Alerta Temprana	131
6.9 Síntesis del capítulo	131
CAPÍTULO 7 Producción de Biomasa Forrajera: Determinantes Climáticos y Edáficos	133
.....	
7.1 Introducción: El Pastizal como Transformador de Señales del Suelo en Alimento para el Hato.....	134
7.2 Protocolo de Medición de Biomasa: La Arquitectura Metodológica.....	135
7.2.1 La Estrategia de Métodos Múltiples	135
7.3 Productividad Primaria Neta Aérea del Corredor: Datos Directos de las Jaulas	137
7.3.1 La Diferencia de Productividad entre Tipos: Un Factor de 4,5×	139
7.3.2 La Estacionalidad de la PPNA: El Cociente de Estrés Productivo	140
7.4 Recalibración del Modelo de PPNA con Coeficientes Propios del Corredor.....	141
7.4.1 Los Nuevos Coeficientes y su Significado Mecanístico.....	143
7.5 Impacto de los Eventos Climáticos Extremos sobre la Biomasa: Cantidad y Calidad	144
7.5.1 La Paradoja de la Biomasa en La Niña: Más Cantidad, Menos Calidad	146
7.6 Calidad Nutricional del Forraje y su Relación con los Nutrientes del Suelo.....	148
7.6.1 El Coeficiente N mineral–PC como el Eslabón 4→5 de la Cadena Causal	150

7.7 Las Series Históricas de PPNA (2018–2024) Reconstruidas con NDVI Sentinel-2 ...	151
7.7.1 La Extensión Temporal con Imágenes Satelitales.....	151
7.8 Integración con la Cadena Causal: Lo que Este Capítulo Provee para los Análisis Siguientes.....	152
7.8.1 Los Parámetros Transmitidos al Capítulo 8.....	152
7.9 Síntesis del capítulo	153
CAPÍTULO 8 Producción de Leche: De la Base Forrajera al Rendimiento del Hato	155
8.1 Introducción: El Eslabón Final de la Cadena Biofísica	156
8.2 Línea de Base de Producción de Leche por Tipo de Sistema	157
8.2.1 La Diferencia de 3,5× entre Tipos: Genética, Forraje y Manejo	159
8.3 El Modelo Integrado de Producción de Leche: de la Base Forrajera al Rendimiento del Hato.....	160
8.3.1 El Papel Central de la Proteína Cruda en el Modelo	162
8.4 Impacto del ENSO sobre la Producción de Leche: Cuantificación por Tipo de Sistema	163
8.4.1 La Asimetría de Mecanismos entre El Niño y La Niña.....	165
8.5 Descomposición de los Mecanismos de Transmisión del ENSO a la Producción de Leche	166
8.5.1 El Mecanismo de la PC como el Más Importante y el Menos Atendido	168
8.6 Validación del Modelo con Datos Provinciales del ESPAC	169
8.6.1 El ESPAC como Punto de Referencia y sus Limitaciones	169
8.7 Escenarios de Producción de Leche al 2035 y 2050 bajo Cambio Climático	169
8.7.1 La Ventana de Oportunidad de Adaptación.....	172
8.8 Síntesis de la Cadena Causal Completa: De la Variabilidad Climática al Rendimiento del Hato.....	173
8.8.1 La Cadena Cuantificada de Principio a Fin.....	173
8.9 síntesis del capítulo	175
CAPÍTULO 9 Modelo Integrado de Ecuaciones Estructurales: La Cadena Causal Completa	177
9.1 Introducción: Del Análisis por Eslabón a la Cadena Integrada	178
9.2 Especificación del SEM Completo: Estructura, Variables y Ecuaciones.....	179
9.2.1 La Arquitectura del Modelo	179
9.2.2 Las Variables Latentes y su Justificación	181
9.3 Índices de Ajuste del SEM Completo: La Teoría Pasa el Test Empírico	182
9.3.1 El Ajuste como Validación de la Teoría	184
9.4 Efectos Directos, Indirectos y Totales: La Cadena Cuantificada.....	184

9.4.1 La Dominancia de la Mediación: El Suelo como el Principal Mediador de la Señal Climática.....	186
9.5 Prueba de Invarianza del Modelo entre Tipos de Sistema	187
9.5.1 La Invarianza Económica como Simplificación Valiosa	189
9.6 Comparación con Modelos Alternativos: La Justificación Estadística del SEM.....	190
9.7 Las Hipótesis del Proyecto: Verificación Final con el SEM.....	192
9.8 El SEM como Mapa de Intervención: Dónde Actuar para el Mayor Impacto.....	193
9.8.1 La Jerarquía de Eficiencia de Intervención por Eslabón	193
9.9 Limitaciones del SEM y Agenda de Investigación Futura.....	194
9.9.1 Las Tres Limitaciones Principales	194
9.10 síntesis del capítulo	195
CAPÍTULO 10 Costos de Producción, Márgenes Económicos e Impacto Financiero de la Variabilidad Climática.....	197
10.1 Introducción: La Traducción del Impacto Biofísico al Lenguaje Económico	198
10.2 Estructura de Costos de Producción por Tipo de Sistema	199
10.2.1 Metodología de la Encuesta de Costos	199
10.2.2 El Costo por Litro como Indicador de Vulnerabilidad Estructural	203
10.3 Márgenes Económicos y Rentabilidad en Año de Fase ENSO Neutra.....	204
10.3.1 El 28% del Tipo I: Inviabilidad Estructural, No Climática	206
10.4 Cuantificación de las Pérdidas Económicas por Evento Climático Extremo	207
10.4.1 La Pérdida Invisible del Descarte Forzoso	211
10.5 Pérdidas Económicas Agregadas a Escala Provincial: El Riesgo Climático como Pasivo Público	212
10.5.1 La EAL como Pasivo Contingente Público	214
10.6 Modelo Econométrico de Panel: Los Determinantes Económicos del Ingreso Ganadero.	215
10.6.1 La Interacción Suplementación × ONI como el Resultado Más Operativo.	217
10.7 Síntesis del capítulo	218
CAPÍTULO 11 Impacto Económico de la Variabilidad Climática: Cuantificación y Escenarios	221
11.1 Introducción: De la Cuantificación Histórica a la Prospectiva Económica.	222
11.2 Marco Analítico de Escenarios: Dimensiones, Supuestos y Fuentes.....	223
11.2.1 La Arquitectura de los Tres Escenarios	223
11.2.2 La Metodología del Valor Presente Neto	225
11.3 Impacto Económico Proyectado al 2035: El Horizonte de Política de Corto Plazo ..	225
11.3.1 El Año 2035 como Horizonte de Decisión de la Política Actual.....	227

11.4 Impacto Económico al 2050: El Largo Plazo y el Punto de Inflexión.....	228
11.4.1 El Escenario SA-B: Por qué la Adaptación Integral Convierte la Catástrofe en Oportunidad	231
11.5 Distribución de Pérdidas e Inequidad Intra-Corredor	232
11.5.1 La Inequidad Climática: El Tipo I Paga la Factura del Clima que Menos Ha Contribuido a Generar.....	234
11.6 Análisis de Sensibilidad: La Robustez del Beneficio Neto de la Adaptación	235
11.6.1 El Resultado Más Robusto: La Adaptación Siempre Paga	236
11.7 El Mapa de Urgencia de Adaptación: Dónde, Cuándo y Cuánto	237
11.7.1 La Geografía del Riesgo Climático Económico al Interior del Tipo I	237
11.8 Síntesis del capítulo	238
CAPÍTULO 12 Análisis Costo-Beneficio de las Estrategias de Adaptación	241
12.1 Introducción: El Costo de Adaptar vs. el Costo de No Adaptar.....	242
12.2 Inventario de Intervenciones y Costos Unitarios	243
12.2.1 Criterios de Selección: La Cadena Causal como Marco de Intervención	243
12.3 BCR, TIR y Período de Recuperación: El Retorno Privado de la Adaptación	245
12.3.1 La Secuencia Óptima de Implementación	248
12.4 El ACB desde la Perspectiva del Sector Público: BCR de 19,4×	249
12.4.1 El Autofinanciamiento del Programa y el Argumento de Eficiencia Pública	251
12.5 Co-beneficios No Monetizados: El Valor Completo de la Adaptación.....	252
12.5.1 El Páramo como Activo de Servicios Ecosistémicos y el PSE como Cofinanciamiento	253
12.6 Comparación Internacional: El Carchi en el Cuartil Superior	255
12.7 El Caso de Inversión, en Síntesis	257
12.8 Síntesis del capítulo	258
CAPÍTULO 13 Propuestas de Adaptación Técnica y de Manejo	260
13.2 Protocolo Integrado de Manejo del Suelo para el Tipo I	263
13.2.1 El Suelo como Punto de Palanca de Mayor Retorno	263
13.3 Protocolo de Manejo del Hato y la Nutrición Animal	267
13.3.1 El Hato como Segunda Palanca: Reducir la Demanda de Forraje y Mejorar la Eficiencia Metabólica.....	267
13.4 El Seguro Climático Indexado Dual: Proteger el Flujo de Caja del Ganadero del Páramo	269
13.4.1 Por qué el Ganadero del Páramo No Puede Protegerse Solo con la Adaptación...	269
13.4.2 El Pago Durante el Episodio: La Innovación Clave del Seguro	273
13.5 Arquitectura Institucional del Programa de Adaptación	274
13.5.1 Los Cinco Actores y la División de Roles	274

13.6 Hoja de Ruta de Implementación: Del Laboratorio al Campo al 2035.....	277
13.6.1 La Ventana Crítica 2025–2028 y el Riesgo del Timing.....	279
13.7 El Mecanismo PSE Socio Páramo: Articulando la Adaptación con la Conservación.....	280
13.7.1 El Diseño del PSE para el Corredor del Carchi	280
13.8 Síntesis del capítulo	282
CAPÍTULO 14 Políticas Públicas e Instrumentos de Gestión del Riesgo Climático	286
14.2 Marco Normativo Vigente: Oportunidades y Brechas	288
14.2.1 La Arquitectura Legal ya Está Construida — El Problema es la Implementación..	288
14.2.2 El Vacío Más Costoso: la Ganadería del Páramo como Zona Gris Normativa.....	291
14.3 El Paquete de Cinco Instrumentos de Política	292
14.3.1 La Coherencia del Paquete: Cómo los Cinco Instrumentos se Refuerzan Mutuamente.....	296
14.4 Marco de Gobernanza Multinivel	297
14.5.1 El Orden Correcto de las Reformas: Por qué RF-1 es la Condición de Todo lo Demás	302
14.6 Marco de Monitoreo y Evaluación	303
14.6.1 El IPGP como Indicador Político de Mayor Impacto	305
14.7 Síntesis del capítulo	307
CAPÍTULO 15 Conclusiones, Limitaciones y Agenda de Investigación	308
15.2 Síntesis de Hallazgos por Parte del Libro	310
15.3 Las Diez Conclusiones Sustantivas del Libro.....	312
15.3.1 Conclusiones sobre la Cadena Causal	312
15.3.2 Conclusiones sobre el Impacto Económico.....	313
15.3.3 Conclusiones sobre la Adaptación y la Política	314
15.4 Limitaciones del Estudio.....	315
15.4.1 Una Nota sobre la Robustez Frente a las Limitaciones	318
15.5 Agenda de Investigación Futura.....	319
15.6 El Lugar del Libro en el Debate Científico sobre la Ganadería Andina y el Cambio Climático.....	322
15.6.1 La Contribución a la Literatura sobre la Cadena Causal ENSO–Producción Agropecuaria	322
15.6.2 La Contribución al Debate sobre el Diseño de los Seguros Climáticos para la Ganadería de Pequeña Escala	323
15.6.3 La Posición del Corredor del Carchi en el Debate sobre la Viabilidad del Páramo Ganadero en el Siglo XXI.....	323
15.7 Epílogo: El Páramo No Espera	324
15.8 Síntesis del capítulo	326

Bibliografía	327
---------------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Zonificación Agroecológica del Corredor Ganadero de Altura del Carchi: Altitud, Clima y Sistema Ganadero Predominante	7
Tabla 2. Indicadores Económicos del Sector Ganadero del Carchi en Comparación con la Media de la Sierra Ecuatoriana (2023)	8
Tabla 3. Tipología de los Sistemas Ganaderos de Altura del Carchi: Características Técnicas, Productivas y de Vulnerabilidad Climática.....	11
Tabla 4. Marco de Hipótesis y Objetivos Específicos del Proyecto de Investigación por Dimensión de Análisis	18
Tabla 5. Variables Climáticas Críticas para los Ecosistemas Ganaderos de Altura de los Andes Ecuatorianos: Rangos Óptimos, Umbrales y Efectos sobre el Ecosistema	26
Tabla 6. Ciclos Biogeoquímicos de los Nutrientes Principales en Pastizales de Altura de los Andes Ecuatorianos: Procesos, Sensibilidad Climática y Efectos sobre la Producción	29
Tabla 7. El Fenómeno ENSO y su Expresión en el Corredor Ganadero de Altura del Carchi: Fases, Efectos Climáticos, Edáficos y Económicos.....	34
Tabla 8. La Cadena Causal Integrada Clima–Suelo–Biomasa–Leche–Economía: Siete Eslabones, Mecanismos de Transmisión y Marcos Teóricos	38
Tabla 9. Marcos Teóricos de Referencia del Proyecto: Autores Fundacionales, Aplicación en el Libro y Capítulos donde se Desarrollan.....	43
Tabla 10. Protocolo PRISMA Adaptado para la Revisión Sistemática de la Literatura sobre Clima, Suelo, Biomasa y Economía Ganadera en los Andes Tropicales.....	49
Tabla 11. Síntesis de los Estudios más Relevantes sobre el Efecto de los Factores Climáticos sobre la Dinámica de Nutrientes del Suelo en Pastizales Andinos de Altura	52
Tabla 12. Síntesis de los Estudios más Relevantes sobre Producción de Leche, Estrés Térmico y Variabilidad Climática en Sistemas Ganaderos de los Andes Tropicales	56
Tabla 13. Síntesis de los Estudios más Relevantes sobre el Impacto Económico de la Variabilidad Climática en Sistemas Ganaderos de Alta Montaña de América del Sur	59
Tabla 14. Las Cinco Brechas de la Literatura Científica que el Proyecto de Investigación Busca Llenar: Descripción, Tipo y Estrategia de Abordaje	65
Tabla 15. Red de Estaciones Meteorológicas e Índices Satelitales Utilizados para la Caracterización Climática del Corredor Ganadero de Altura del Carchi (2000–2024).....	73
Tabla 16. Temperatura Media Mensual, Coeficiente de Variación Interanual y Tendencia 2000–2024 por Zona Altitudinal del Corredor Ganadero del Carchi	75
Tabla 17. Precipitación Media Anual, Variabilidad Interanual y Tendencias por Zona Altitudinal del Corredor Ganadero del Carchi (2000–2024)	77
Tabla 18. Catálogo de Eventos Climáticos Extremos del Corredor Ganadero de Altura del Carchi (2000–2024): Características, Efectos y Lecciones para el Proyecto	79
Tabla 19. Índices Climáticos para la Producción Ganadera del Corredor del Carchi (2000–2024): Definiciones, Valores Históricos y Relevancia para el Proyecto	83
Tabla 20. Proyecciones Climáticas para el Corredor Ganadero de Altura del Carchi al 2035 y 2050 bajo los Escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC (Cambios Respecto al Promedio Histórico 2000–2024)	87
Tabla 21. Diseño del Muestreo Edáfico del Proyecto: Estratificación por Tipo de Sistema, Protocolo de Campo y Análisis de Laboratorio	94
Tabla 22. Propiedades Físicas y Químicas Basales de los Suelos del Corredor Ganadero del Carchi, Desagregadas por Tipo de Sistema Ganadero (profundidad 0–20 cm, n=80 UPAs, período de muestreo: primer semestre 2023).....	96

Tabla 23. Estado Nutricional del Suelo del Corredor Ganadero del Carchi: Disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg y S por Tipo de Sistema, con Umbrales de Suficiencia para Pastizales de Altura (INIAP, 2022)	99
Tabla 24. Indicadores Microbiológicos del Suelo y Actividad Enzimática en las UPAs Centinela del Corredor Ganadero del Carchi, por Tipo de Sistema (promedio anual 2023–2024; n=2 UPAs centinela por tipo)	102
Tabla 25. Diagnóstico Integrado de las Seis Limitaciones Edáficas de Mayor Prevalencia en el Corredor Ganadero de Altura del Carchi: Prevalencia, Sistemas Afectados, Efectos sobre la Producción y Estrategias de Corrección	106
Tabla 26. Modelos de Regresión Lineal Mixta para la Disponibilidad de N Mineral en Función de la Temperatura y la Humedad del Suelo, por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (n = 192 observaciones por tipo; período 2023–2024)	115
Tabla 27. Efectos de los Eventos de Lluvia Intensa y de los Períodos de Sequía sobre el Potasio Intercambiable y el Nitrógeno Mineral del Suelo, por Tipo de Sistema (UPAs centinela; n = 8; período 2023–2024)	118
Tabla 28. Análisis de Series de Tiempo de las Variables del Suelo y del Clima en las UPAs Centinela del Corredor del Carchi: Componentes, Correlaciones con el ENSO y Rezagos Óptimos (período 2023–2024, n = 8 UPAs, 24 meses)	121
Tabla 29. Impacto Cuantificado de las Cuatro Fases del ENSO sobre la Disponibilidad de N Mineral, P Disponible y K Intercambiable del Suelo, por Tipo de Sistema del Corredor Ganadero del Carchi	124
Tabla 30. Los Cuatro Modelos Estadísticos para la Operacionalización de los Eslabones 1–4 de la Cadena Causal Clima–Nutrientes del Corredor del Carchi: Especificación, Resultados y Articulación con el Cap. 9	127
Tabla 31. Protocolo Integrado de Medición de Biomasa Forrajera del Proyecto: Métodos, Escalas Espaciotemporales, N.º de Observaciones y Articulación con los Datos Climáticos y Edáficos.....	135
Tabla 32. Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), Tasa de Acumulación Diaria, Composición Florística y Calidad Nutricional del Forraje por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (datos de jaulas de exclusión, UPAs centinela, período 2023–2024)...	137
Tabla 33. Comparación entre el Modelo de Referencia y el Modelo Recalibrado de PPNA con Coeficientes Propios del Corredor del Carchi: Ecuaciones, Coeficientes y Mejoras de Ajuste	141
Tabla 34. Impacto Cuantificado de los Cinco Tipos de Eventos Climáticos Extremos sobre la Productividad de Biomasa y la Calidad Nutricional del Forraje, por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi.....	144
Tabla 35. Calidad Nutricional del Forraje en el Corredor Ganadero del Carchi: Valores Mínimos, Promedios y Máximos, y Coeficientes de Correlación con los Nutrientes del Suelo (UPAs centinela, período 2023–2024).....	148
Tabla 36. Línea de Base de Producción de Leche, Características del Hato y Parámetros Reproductivos por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (período de fase ENSO neutra 2023–2024)	157
Tabla 37. Especificación del Modelo Integrado de Producción de Leche del Corredor del Carchi: Componentes, Ecuaciones, Parámetros Estimados y Validación	160
Tabla 38. Impacto Cuantificado de las Cuatro Fases del ENSO sobre la Producción de Leche por Tipo de Sistema del Corredor Ganadero del Carchi, con Validación Externa contra los Datos del ESPAC.....	163
Tabla 39. Descomposición del Impacto del ENSO sobre la Producción de Leche del Tipo I en sus Mecanismos de Transmisión, con Implicaciones para el Diseño de Instrumentos de Política	166

Tabla 40. Escenarios de Producción de Leche al 2035 y 2050 bajo Cambio Climático y Distintos Niveles de Adaptación, por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi..	169
Tabla 41. Especificación del SEM Completo: Ecuaciones por Eslabón, Variables Latentes, Variables Observadas y Parámetros Estimados (datos del proyecto UPEC, corredor del Carchi, 2023–2024)	179
Tabla 42. Índices de Ajuste del SEM Completo: Valores Observados, Criterios de Referencia y Comparación con el SEM Parcial del Capítulo 6	182
Tabla 43. Efectos Directos, Indirectos y Totales Estandarizados del SEM Completo para las Seis Relaciones Causales de Mayor Relevancia para la Política Agropecuaria del Corredor del Carchi (Tipo I)	184
Tabla 44. Prueba de Invarianza del SEM entre los Cuatro Tipos de Sistema Ganadero: Coeficientes Invariantes y Coeficientes que Difieren Significativamente	187
Tabla 45. Comparación del SEM Completo con Cinco Modelos Alternativos: Δ AIC, Δ RMSEA y Análisis de lo que cada Modelo Alternativo Pierde.....	190
Tabla 46. Estructura Detallada de Costos de Producción por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (USD/finca/año; precios constantes 2024; n = 80 UPAs del proyecto)	200
Tabla 47. Márgenes Económicos, Punto de Equilibrio y Retorno sobre el Activo por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (USD/finca/año; fase ENSO neutra 2023–2024)	204
Tabla 48. Pérdidas Económicas por Finca durante los Principales Eventos Climáticos Extremos del Corredor del Carchi, Desagregadas por Componente y Tipo de Sistema (USD/finca/episodio; precios constantes 2024).....	207
Tabla 49. Pérdidas Económicas del Sector Ganadero Lechero del Carchi a Escala Provincial: Pérdida por Episodio, Distribución entre Tipos de Sistema y Pérdida Anualizada Esperada (EAL)	212
Tabla 50. Modelo Econométrico de Panel con Efectos Fijos para los Determinantes del Ingreso Ganadero Mensual en el Corredor del Carchi (n = 80 UPAs × 24 meses = 1.920 observaciones; variable dependiente: ln(Ingreso_bruto_mensual))	215
Tabla 51. Marco Analítico de los Tres Escenarios Climático-Económicos del Capítulo 11: Dimensiones, Supuestos y Fuentes Empíricas.....	223
Tabla 52. Económico Proyectado al 2035 bajo los Tres Escenarios Climático-Económicos para el Tipo I del Corredor del Carchi.....	225
Tabla 53. Impacto Económico Proyectado al 2050 bajo Cuatro Sub-Escenarios para el Tipo I del Corredor del Carchi, con Punto de Inflexión de Inviabilidad Económica	228
Tabla 54. Distribución de las Pérdidas Climáticas e Inequidad Intra-Corredor al 2035 bajo los Escenarios Conservador y Tendencial: Coeficiente de Gini, Ratio de Vulnerabilidad, CV del Ingreso e Índice de Persistencia Ganadera del Páramo	232
Tabla 55. Análisis de Sensibilidad del VAN del Beneficio Neto de la Adaptación Moderada (Escenario ST vs. SC) al 2050 para el Tipo I: Impacto de Cinco Supuestos Clave	235
Tabla 56. Inventario de las Seis Intervenciones de Adaptación, Costos Unitarios, Costos a Escala del Corredor y Características Técnicas para el Tipo I del Corredor del Carchi	243
Tabla 57. Relación Beneficio-Costo, Tasa Interna de Retorno y Período de Recuperación de las Seis Intervenciones y los Dos Paquetes para el Tipo I del Corredor del Carchi (horizonte: 10 años; tasa de descuento: 8%)	245
Tabla 58. Análisis Costo-Beneficio desde la Perspectiva del Sector Público: Costos del Programa Subsidiado y Beneficios Públicos Directos e Indirectos del Paquete Básico para el Tipo I del Corredor del Carchi.....	249
Tabla 59. Co-beneficios Ambientales y Sociales No Monetizados del Paquete de Adaptación para el Tipo I del Corredor del Carchi al 2035 (con adopción del 40% de las 620 fincas)...	252

Tabla 60. Comparación del BCR del Paquete de Adaptación del Corredor del Carchi con Cinco Casos de Ganadería de Alta Altitud en los Andes Latinoamericanos	255
Tabla 61. Protocolo Integrado de Manejo del Suelo para el Tipo I del Corredor del Carchi: Prácticas, Dosis, Momentos de Aplicación, Indicadores de Éxito y Justificación	263
Tabla 62. Protocolo de Manejo del Hato y la Nutrición Animal para el Tipo I del Corredor del Carchi: Prácticas Clave, Protocolos Operativos y Justificación	267
Tabla 63. Diseño del Seguro Climático Indexado Dual (SID) para el Sector Ganadero del Corredor del Carchi: Variable Índice, Umbrales de Activación, Prima, Mecanismo de Pago e Incentivos de Adopción	270
Tabla 64. Arquitectura Institucional del Programa de Adaptación Climática Ganadera del Corredor del Carchi (PACCGC): Cinco Actores, Roles, Capacidades Actuales y Fortalecimiento Institucional Necesario	274
Tabla 65. Hoja de Ruta de Implementación del PACCGC en Cuatro Fases (2025–2035): Acciones Prioritarias, Indicadores de Logro y Presupuesto por Fuente de Financiamiento	277
Tabla 66. Marco Normativo Vigente Relevante para la Ganadería del Páramo del Carchi: Disposiciones, Brechas de Implementación y Recomendaciones de Reforma.....	289
Tabla 67. Paquete de Cinco Instrumentos de Política para la Gestión del Riesgo Climático en la Ganadería del Páramo del Carchi: Diseño, Justificación y Condiciones de Implementación	292
Tabla 68. Marco de Gobernanza Multinivel del PACCGC: Cuatro Niveles, Instrumentos de Articulación, Actores y Flujos de Información.....	297
Tabla 69. Reformas Normativas Necesarias para la Implementación del PACCGC: Contenido, Urgencia, Horizonte Temporal y Actores Responsables	299
Tabla 70. Marco de Monitoreo y Evaluación del PACCGC: Seis Indicadores con Línea de Base 2024, Metas al 2030 y 2035, y Sistema de Reporte.....	303
Tabla 71. Tabla Limitaciones Metodológicas del Estudio, Magnitud del Efecto sobre las Conclusiones Principales y Recomendaciones para Investigaciones Futuras	315
Tabla 72. Agenda de Investigación Futura: Seis Líneas de Investigación con Horizonte Temporal, Tipo de Estudio, Pregunta Específica y Metodología Recomendada	319

INTRODUCCIÓN

La producción de leche es una de las actividades agropecuarias más significativas que se llevan a cabo en las regiones altoandinas de la provincia del Carchi, Ecuador. Las condiciones geográficas de este espacio están determinadas por un relieve montañoso, los diferentes pisos altitudinales y condiciones climáticas con una marcada variabilidad, todas estas características han permitido la elaboración de sistemas productivos organizados principalmente en torno a la ganadería de leche . Al norte de la región interandina ecuatoriana, en particular en Carchi, tienen lugares paisajes agrícolas y pecuarios que tienen que ver con suelos de origen volcánico combinados con condiciones de clima húmedo y frío, elementos que determinan el funcionamiento de los sistemas agropecuarios. (Franco et al., 2026)

La relevancia de la actividad lechera en Carchi también se encuentra relacionada con la pluralidad de productores y sistemas de producción presentes. Cohabitan en la provincia unidades familiares y explotaciones de un mayor tamaño, con importantes disparidades en la superficie, el nivel de intensificación, la disponibilidad de recursos, de la tecnología y la productividad. Una de esas diferencias indica que la producción de leche no sigue un único modelo a la producción, sino que son distintas formas en las que la explotación organiza y aprovecha los recursos que disponen (Teran y Cobo, 2017). Los estudios efectuados en la provincia han analizado además las características de la gestión de las explotaciones lecheras, abordando los aspectos relacionados con la infraestructura, el equipamiento, las condiciones de higiene, el bienestar del animal, el ordeño y la gestión de la leche .

En este escenario, la producción de leche en los sistemas de altura no se puede pensar sólo en los factores que están directamente relacionados con el ganado. El desempeño de este tipo de sistemas da lugar a un funcionamiento que se vale de la interacción de las condiciones climáticas, de las características del suelo, de la disponibilidad de nutrientes, de la producción de forraje, de la alimentación del ganado y de las prácticas de manejo implementadas por los productores. Las condiciones de temperatura y precipitación serán, en particular las que afectan la disponibilidad y la digestibilidad de los pastizales, perjudicando la alimentación del ganado por consiguiente respuesta de determinados componentes de la producción y composición de la leche. En ocasiones, investigaciones en Carchi han puesto en evidencia la relación entre alimentación y condiciones climáticas y la calidad composicional de la leche (De la Cruz et al., 2018).

A partir de esta realidad surge la problemática central que motiva la presente obra: la necesidad de comprender cómo la variabilidad climática influye en la dinámica de los nutrientes del suelo y cómo estos cambios pueden repercutir sobre la producción de biomasa, la producción de leche y los resultados económicos de los sistemas ganaderos de altura. El proyecto en el que se fundamenta este libro plantea esta relación como una cadena de procesos en la que las condiciones climáticas interactúan con el suelo y sus procesos biológicos, modifican la disponibilidad de nutrientes y afectan posteriormente la producción de biomasa forrajera, la leche y los ingresos económicos.

Desde esta perspectiva, el objetivo general del libro es analizar de manera integral las relaciones entre las condiciones climáticas, la dinámica de los nutrientes del suelo, la producción de biomasa, la producción de leche y la economía de los sistemas ganaderos de altura del Carchi. El proyecto articula estas dimensiones mediante el estudio de la variabilidad climática, las propiedades y nutrientes del suelo, la producción de biomasa y leche y los efectos económicos asociados a estas relaciones.

El esquema de la obra en cuestión obedece a un enfoque progresivo e integrador y está constituido por el conjunto de cinco partes y quince capítulos que la componen. Su organización permite el tránsito desde la contextualización territorial y conceptual de los sistemas ganaderos de altura hasta el análisis de las interacciones que se establecen entre el clima, el suelo, los nutrientes, la biomasa, la producción de leche y la economía ganadera. Cuando cada parte exponen una dimensión del problema, lo hace manteniendo a la vez una actividad permanente con las otras, de tal manera que el lector sea capaz de entender la producción lechera como un sistema en el que se interrelacionan factores ambientales, productivos, económicos y sociales.

CAPÍTULO 1

La Ganadería de Altura del Carchi:

Territorio, Sistemas Productivos y Problemática

Caracterización geográfica y agroecológica del corredor ganadero, tipología de sistemas productivos, importancia económica del sector lechero, diagnóstico de la problemática e hipótesis y objetivos del proyecto de investigación



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** las características geográficas del corredor ganadero de altura del Carchi, considerando su ubicación, extensión y distribución altitudinal.
- **Identificar** los cuatro tipos de sistemas ganaderos de altura del Carchi —extensivo de páramo, lechero familiar semintensivo, lechero tecnificado y empresarial intensivo— y sus principales características productivas y de manejo.
- **Reconocer** la importancia económica de la actividad ganadera en la provincia del Carchi, considerando su relación su relación con el empleo rural, con el empleo rural, la producción de leche y la seguridad alimentaria.
- **Diagnosticar** la problemática que justifica el proyecto de investigación: la interacción entre la variabilidad climática creciente, la dinámica de nutrientes del suelo y la vulnerabilidad económica de los sistemas ganaderos de altura.
- **Reconocer** las cinco dimensiones de análisis del proyecto de investigación climática, edáfica, productiva de biomasa, productiva de leche y económica y su articulación dentro del estudio.
- **Contextualizar** la problemática de los sistemas ganaderos de altura del Carchi frente a los desafíos vinculados con la variabilidad y el cambio climático en los Andes Ecuatorianos.

1.1 Introducción: El Páramo que Produce

La provincia de Carchi tiene una ubicación estratégica para la producción ganadera y láctea en el norte de Ecuador. Los diversos sistemas de producción de la provincia coexisten con múltiples formas de manejo y niveles socioeconómicos, y se han desarrollado en base a las condiciones ambientales típicas de la región andina. Algunos estudios recientes sobre la provincia han identificado la diversidad de los sistemas de ganadería lechera en la producción, destacado los diferentes componentes socioeconómicos y de manejo, y evidenciado la necesidad de fortalecer las prácticas para garantizar la subsistencia y la eficiencia de los sistemas lácteos (Cayambe et al., 2024).

La producción lechera constituye una actividad de especial importancia en la provincia del Carchi, donde predominan sistemas familiares y extensivos con diferentes niveles de manejo y productividad. En el territorio se han identificado miles de fincas ganaderas y una diversidad de unidades productivas que contribuyen al abastecimiento de leche y al sostenimiento de las economías rurales. De acuerdo con investigaciones recientes, las vacas de los sistemas ganaderos del Carchi alcanzan un rendimiento promedio cercano a 9,4 litros de leche por día, aunque existen diferencias importantes entre los sistemas productivos y las condiciones de manejo (Carvajal L. et al., 2025)

Estas condiciones pueden causar efectos acerca del bienestar y el desempeño productivo de los animales, en particular cuando las variaciones de temperatura, precipitación y disponibilidad de forraje varían las condiciones de alimentación y manejo de los sistemas ganaderos. A su vez, los cambios en la disponibilidad y calidad del forraje pueden repercutir acerca la productividad y los resultados económicos de las unidades ganaderas. En este contexto, la evaluación de la ganadería de altura en Carchi necesita constatar las características territoriales, climáticas y edáficas que condicionan el funcionamiento de los sistemas productivos. Este libro, y el primer capítulo en particular, parten de una convicción fundamental: para comprender la ganadería de altura en Carchi, es necesario entender su territorio.

No como un simple escenario pasivo donde ocurre la producción, sino como un sistema vivo lleno de interacciones entre el clima, el suelo, las plantas, los animales y las personas que determinan, con más fuerza que cualquier otra variable, si la ganadería de altura en Carchi prosperará o simplemente sobrevivirá en este siglo XXI.

1.2 Caracterización Geográfica y Agroecológica del Corredor Ganadero del Carchi

1.2.1 Ubicación y Contexto Regional

La provincia de Carchi se encuentra en el extremo norte de Ecuador, en la zona interandina. Limita al norte con Colombia, al sur con Imbabura, al este con Sucumbíos y al oeste con Esmeraldas. Con una superficie de 3.604,3 km² y una población cercana a los 188.000 habitantes (INEC, 2022), Carchi es una de las provincias más pequeñas del país en términos de extensión, pero juega un papel crucial en la producción agropecuaria por cada unidad de superficie. Su ubicación fronteriza con Colombia, a través del puente de Rumichaca, le añade una doble dimensión. Por un lado, es una provincia productora; Carchi es reconocida como una de las principales fuentes de leche, papa, hortalizas y granos andinos del Ecuador. Por otro lado, el hecho de ser un territorio de frontera conlleva varias complejidades en los ámbitos logístico, económico e institucional.

Las montañas de la cordillera occidental y la cordillera real delimitan el territorio carchense, creando una serie de valles, cuchillas y páramos que aportan una notable diversidad agroecológica en un área relativamente pequeña. Las altitudes varían desde los 800 msnm en las laderas occidentales de la cuenca del Mira hasta los 4.723 msnm en el volcán Chiles, lo que genera diferentes gradientes térmicos y de precipitación que afectan la distribución de los sistemas productivos, especialmente los ganaderos de altura, que son el foco de este estudio.

1.2.2 Zonificación Agroecológica del Corredor Ganadero

Para los propósitos de este proyecto de investigación, entendemos el corredor ganadero de altura del Carchi como el conjunto de áreas agroecológicas que se encuentran entre los 2.200 y los 4.000 metros sobre el nivel del mar. Dentro de este rango, la ganadería bovina, especialmente aquella centrada en la producción de leche, se presenta como la principal o secundaria actividad económica de las unidades productivas.

Es importante señalar que esta definición responde a criterios agroecológicos y productivos, por lo que excluye las zonas subtropicales del occidente Carchense, como la Concepción y los sectores bajos de Mira, cuyas condiciones climáticas y altitudinales son diferentes de las zonas altoandinas. El gobierno Provincial de Carchi reconoce esta diferenciación territorial, estableciendo distintos pisos, según altitud y características agroecológicas. Por ello este libro deja fuera las zonas subtropicales del occidente carchense, como Mira, El Ángel bajo y La Concepción, donde la ganadería está más orientada hacia la producción de carne tropical.

En este contexto, se incluyen también los cinco pisos agroecológicos que se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Zonificación Agroecológica del Corredor Ganadero de Altura del Carchi: Altitud, Clima y Sistema Ganadero Predominante

Zona Agroecológica	Altitud (msnm)	Temperatura Media (°C)	Precipitación Media (mm/año)	Sistema Ganadero Predominante
Zona de páramo ganadero	3.400 – 4.000	6 – 10	800 – 1.200	Ganadería extensiva de carne; bovinos criollos y mestizos; pastoreo de kikuyo y pasto azul.
Zona de transición alto-andina	3.000 – 3.400	10 – 13	1.000 – 1.400	Ganadería lechera extensiva-semintensiva; Holstein y mestizos; pastos mejorados y kikuyo.
Zona de ladera media	2.600 – 3.000	13 – 16	1.200 – 1.600	Ganadería lechera semintensiva; Holstein Friesian y Brown Swiss; mezclas forrajeras y suplementación.
Zona de valle interandino	2.200 – 2.600	16 – 18	600 – 900	Ganadería lechera intensiva y doble propósito; Holstein puro; suplementación con balanceado; riego.
Zona subtropical (Mira–El Ángel)	1.200 – 2.200	18 – 24	800 – 1.200	Ganadería de carne y doble propósito; Brahman y mestizos cebuinos; pasturas tropicales y subtropicales.

Nota. Elaboración propia con base en INAMHI (2023) y MAG-Carchi (2023).

1.2.3 Los Suelos del Corredor Ganadero: Una Herencia Volcánica

En el corredor ganadero de altura del Carchi, los suelos son principalmente Andisoles, que son suelos volcánicos formados a partir de cenizas y materiales piroclásticos. En estos territorios predominan suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas, entre los que se enlistan primordialmente Andisoles, sin embargo sectores intermedios y bajos también se presentan Mollisoles. Diferentes investigaciones realizadas en los cantones Tulcán y Huaca entre los 2.700 y 3.200 m.s.n.m identificaron a Hapludandas Melanudands y Andic Hapludolls, confirmando la importancia del origen volcánico y de las condiciones topográficas y climáticas en la formación y la distribución de los suelos de Carchi (Franco et al., 2016)

Los Andisoles del corredor ganadero presentan propiedades físicas y químicas lo cual son de relevancia para la regulación hídrica y la producción agropecuaria, aunque su manejo puede ser sensibles en ciertas ocasiones. Además, cuentan con un alto contenido de materia orgánica, que oscila entre el 5% y el 15% en los primeros 30 cm de profundidad (Mosquera et al., 2020). Su densidad aparente es baja, en un rango de 0,4 a 0,8 g/cm³, y tienen una notable capacidad para fijar fósforo. Esto los hace ricos en muchos nutrientes, aunque a menudo presentan una deficiencia de fósforo disponible para las plantas, un desafío que puede agravarse con las variaciones climáticas.

Los suelos de páramo, como los Histosoles y Andisoles orgánicos que se encuentran a más de 3.400 metros sobre el nivel del mar, son además depósitos excepcionales de carbono orgánico. Estos suelos pueden almacenar entre 150 y 500 toneladas de carbono por hectárea en el primer metro de su perfil, posicionándolos como algunos de los mayores reservorios de carbono en el mundo por unidad de área (Poulenard et al., 2003).

Sin embargo, la ganadería extensiva en estos suelos puede tener efectos negativos. Cuando el ganado compacta el suelo al pisotearlo y se pierde la cobertura vegetal, se corre el riesgo de liberar ese carbono almacenado y de dañar de forma irreversible la estructura del suelo, lo que compromete la productividad del ecosistema.

1.3 Importancia Económica del Sector Ganadero en el Carchi

1.3.1 El Peso del Sector Ganadero en la Economía Provincial

La ganadería bovina, especialmente a través de la producción de leche, se ha convertido en el corazón de la economía rural del Carchi. Este sector no solo es vital, sino que también representa un impresionante 34,2% del PIB provincial (BCE, 2022), una cifra que supera con creces la media nacional de la participación del sector primario en las economías de la Sierra ecuatoriana. Además, más de 61.800 familias rurales, lo que equivale al 61,8% de todos los hogares rurales en la provincia, dependen de ingresos directos o indirectos generados por la ganadería. Esto convierte al sector en el principal mecanismo para la distribución de ingresos en la zona rural del Carchi.

Tabla 2.

Indicadores Económicos del Sector Ganadero del Carchi en Comparación con la Media de la Sierra Ecuatoriana (2023)

Indicador	Carchi (2023)	Sierra Ecuatoriana (2023)	Fuente
Número de UPAs con ganadería bovina	12.847	418.620	INEC — ESPAC 2023
Inventario bovino (cabezas)	186.400	3.421.000	INEC — ESPAC 2023
Producción de leche (litros/día)	1.042.000	6.890.000	INEC — ESPAC 2023
Rendimiento promedio (litros/vaca/día)	9,8	8,4	INEC — ESPAC 2023; MAGAP 2023
Superficie en pastos (hectáreas)	98.200	1.645.000	INEC — ESPAC 2023
Carga animal promedio (UA/ha)	1,42	1,18	MAGAP — Carchi 2023
Precio promedio de leche al productor (USD/litro)	0,46	0,44	MAGAP 2023; Agro-calidad 2023
Contribución del sector ganadero al PIB provincial (%)	34,2	—	BCE — Cuentas Provinciales 2022
Familias rurales con ingresos del sector ganadero (%)	61,8	—	INEC — ENEMDU 2023
Exportaciones lácteas de industrias con base en Carchi (USD millones/año)	28,4	—	PRO-ECUADOR 2023

Nota. UPAs: Unidades de Producción Agropecuaria. ESPAC: Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos. MAGAP: Ministerio de Agricultura y Ganadería (ahora MAG). BCE: Banco Central del Ecuador. PRO-ECUADOR: Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones

1.3.2 La Cadena de Valor del Sector Lechero Carchense

La cadena de valor del sector lechero del Carchi se organiza en cinco componentes clave: la producción primaria, que incluye a los ganaderos; el acopio y enfriamiento; la industria que procesa la leche; la distribución y, finalmente, la comercialización. Las características únicas de su geografía fronteriza hacen que esta cadena tenga dos aspectos: uno enfocado en el mercado ecuatoriano y otro que se extiende hacia el mercado colombiano.

La cadena de valor del sector lechero del Carchi se compone de cinco eslabones primordiales: producción primaria, acopio, enfriamiento, transformación industrial, distribución y

comercialización. Corresponde a una secuencia d actividades que forman en la producción, procesamiento, agregación de valor del sector lechero (Nahar et al., 2022)

En el ámbito interno, la leche producida en Carchi surte, no sólo a las plantas procesadoras existentes dentro del mismo Carchi (Prolacner y Alpina Ecuador) sino, además, a varias queserías tradicionales de la provincia. La leche producida en Carchi se traslada a las instalaciones de grandes industrias lecheras nacionales (Nestlé, Andina y Rey Leche), aprovechando las rutas del acopio que llegan a los valles más altos . El precio que reciben los productores es de USD 0.46 por litro durante el año 2023 en promedio , cifra que está por encima de la media de la Sierra de USD 0. 44 por litro. Esto refleja el reconocimiento de la calidad de la leche que se produce a esas altas condiciones.

En el ámbito binacional, la proximidad a Colombia, quien es el segundo mayor productor de leche en el continente sudamericano, origina un mercado informal y semiformal de leche y queso fresco, que al mismo tiempo es una opción en complemento con la rentabilidad de los ganaderos de la franja fronteriza, en particular en los momentos en que la oscilación del tipo de cambio COP/USD es favorable para las exportaciones informales. El comercio fronterizo corresponde el intercambio de bienes que se lleva a cabo entre territorios de países contiguos, mediante canales formales e informales. En el sector lechero del Carchi se ha constatado una importante identificación de mercados informales, aspecto asociado a las particularidades de tipo socioeconómico entre pequeños y medianos productores de la frontera (Carvajal et al., 2024).

1.4 Tipología de los Sistemas Ganaderos de Altura del Carchi

La heterogeneidad del corredor ganadero de altura del Carchi —en términos de altitud, superficie, tecnología y orientación productiva— hace necesaria la construcción de una tipología de sistemas ganaderos que permita diseñar intervenciones diferenciadas y que sirva como marco de referencia para el análisis de la relación clima–suelo–biomasa–leche en contextos productivos distintos. La tipología propuesta en este proyecto se basa en cuatro criterios: altitud predominante de operación, nivel de tecnificación e intensidad de manejo, orientación productiva principal y nivel de capitalización.

Tabla 3.

Tipología de los Sistemas Ganaderos de Altura del Carchi: Características Técnicas, Productivas y de Vulnerabilidad Climática

Característica	Tipo Extensivo Páramo	I: de	Tipo II: Lechero Familiar Semintensivo	Tipo III: Lechero Tecnificado	Tipo Empresarial Intensivo	IV:
Altitud predominante (msnm)	3.200 – 4.000		2.800 – 3.400	2.600 – 3.200	2.200 – 2.800	
Tamaño promedio (ha)	35 – 120		8 – 35	20 – 80	80 – 500+	
Inventario bovino (cabezas)	15 – 60		10 – 40	30 – 150	150 – 1.000+	
Producción de leche (L/vaca/día)	4 – 7		8 – 12	12 – 18	18 – 28	
Manejo de pastos	Extensivo sin riego; kikuyo y paja		Semintensivo con rotación parcial	Rotación sistematizada; mezclas forrajeras	Intensivo con riego; pastos mejorados	
Suplementación	Ninguna esporádica sequía	o en	Sales minerales; balanceado ocasional	Balanceado regular; ensilaje	Ración total mezclada (RTM); ensilaje	
Fertilización	No realiza		Orgánica; ocasional urea	Plan de fertilización básico	Plan de fertilización basado en análisis de suelos	
Acceso a crédito formal (%)	12		34	68	91	
Análisis de suelos periódico (%)	3		18	52	87	
Registro de producción (%)	8		25	71	96	
Vulnerabilidad a la variabilidad climática	Muy alta		Alta	Media	Baja-media	

Nota. Elaboración propia.

1.4.1 El Sistema Tipo I como Caso Crítico

Las características que presenta el sistema Tipo I de la ganadería extensiva de páramo (más de 1000 m. de altura, ecosistemas muy vulnerables, poca tecnificación, escasa capacidad de inversión, márgenes económicos muy recortados) pueden incrementar la vulnerabilidad de las unidades productivas frente a la variabilidad climática y a la vez limitar su capacidad de adaptación a los efectos de la variabilidad climática. Por estas condiciones, este sistema requiere una atención especial en el análisis de las relaciones existentes entre clima, suelo, disponibilidad de nutrientes y producción de leche.

Los resultados obtenidos a partir de dicha encuesta piloto, realizada a los productores clasificados como pertenecientes al Sistema Tipo I, revelan que el 12 % de los entrevistados reportó disponer de crédito formal, el 3 % indicaron que realizaban análisis de suelos, un 8 % respondieron que llevaban registros sistemáticos de la producción y un 64 % respondieron que los terrenos utilizados para la actividad ganadera fueron heredados por sus familias de sus ancestros. Estas cifras porcentuales solamente pueden ser interpretadas dentro del contexto de la muestra piloto analizada, no pudiendo considerarse como representaciones del conjunto de ganaderas y ganaderos de páramo del Carchi sin contar con una muestra estadísticamente representativa.

Los resultados obtenidos en la encuesta piloto señalaban una escasa disponibilidad de herramientas financieras, técnicas y de gestión de las que disponían los sujetos productores analizados. En el mismo sentido, los participantes indicaron que existe una disminución de la producción de leche en la última década. Aun así, este resultado corresponde a una percepción dada por el grupo de productores, por lo que no puede implicar por sí sólo establecen una relación causal. En este sentido, la investigación planteó como hipótesis que la variabilidad climática puede modificar la dinámica de los nutrientes del suelo y por este mecanismo tener efectos sobre la disponibilidad de nutrientes, la productividad de los pastizales y la producción de leche. Esta relación deberá ser contrastada con el análisis de las variables climáticas, edáficas y productivas consideradas en el estudio.

En la vertiente de un tipo de información complementaria, para el caso de un productor del Sistema Tipo I ubicado en la zona de páramo de El Ángel, se realizó una entrevista en profundidad para el levantamiento de percepciones sobre los cambios que ha observado en la producción y en las condiciones de manejo de la actividad ganadera. Su testimonio fue

considerado como evidencia cualitativa complementaria, y no como un tipo de evidencia estadística equiparable a la de todos los productores del sistema.

Como uno de los ganaderos del Tipo I de la zona de páramo de El Ángel expresó en una entrevista en profundidad:

"Antes el pasto aguantaba bien el invierno, crecía bonito. Ahora con las lluvias tan irregulares el pasto se pone amarillo y las vacas bajan la producción, aunque uno no cambie nada en el manejo." (*Ganadero del Tipo I, zona de páramo de El Ángel, entrevista en profundidad, 2023*)"

Este testimonio, obtenido durante las entrevistas exploratorias en la fase de diseño del proyecto, ilustra claramente el mecanismo que el libro se propone documentar de manera científica: la irregularidad climática afecta el estado nutricional del suelo y la calidad de la biomasa, lo que a su vez resulta en una menor producción de leche, incluso sin modificar el manejo del ganado. La tarea del proyecto consiste en cuantificar esta relación con el rigor metodológico necesario para que la política agropecuaria pueda desarrollar respuestas efectivas.

1.5 Diagnóstico de la Problemática: La Triple Crisis del Corredor Ganadero de Altura

1.5.1 La Crisis Climática: Una Variabilidad que Crece

En las últimas dos décadas, el corredor ganadero de altura del Carchi ha visto transformaciones en sus patrones climáticos que los productores han notado como una creciente irregularidad. Los inviernos se han vuelto más intensos, pero más breves; los veranos, en cambio, son más secos y se extienden por más tiempo. Las heladas, que antes eran poco comunes, ahora se presentan en meses inesperados. Además, los eventos extremos, como intensas granizadas, lluvias continuas que superan los veinte días y sequías que duran más de cuarenta días en la zona alto-andina, parecen ser cada vez más habituales (Diego y Patrick, 2011)

Los cambios se alinean con los modelos climáticos regionales para los Andes tropicales. Es decir la variabilidad climática interanual se intensificará de manera significativa bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Esto significa que habrá más años extremos, desde muy secos o húmedos y una estacionalidad que será menos predecible (Vuille et al., 2018; Marengo et al., 2020).

Según los datos del INAMHI, las estaciones meteorológicas del Carchi indican que desde 1980, la temperatura media en las áreas altas ha subido alrededor de 0,3°C cada década. Asimismo, esta variabilidad de la precipitación anual, que se expresa en forma de coeficiente de variación, ha aumentado en las zonas por encima de los 3.000 metros de altitud en los últimos 20 años.

Pese a que estos cambios pueden parecer de poca importancia, las implicaciones que traen consigo son muy significativas para los ecosistemas de los pastizales de altura. En ellos, los rangos de temperaturas óptimas para el desarrollo de la hierba son relativamente elevados y la disponibilidad de nutrientes del suelo es extremadamente sensible al cambio de temperatura o de humedad.

1.5.2 La Crisis Edáfica: Suelos Bajo Presión

La segunda dimensión del problema radica en la degradación progresiva de los suelos de pastoreo en las zonas altas del Carchi, especialmente en las áreas de mayor altitud y donde el pastoreo es más extenso.

Los análisis de suelo disponibles, aunque fragmentarios y carentes de un enfoque sistemático, lo que ya representa un desafío para la política agropecuaria, revelan tres tendencias alarmantes: una reducción en el contenido de materia orgánica en suelos que han estado bajo pastoreo continuo por encima de los 3.000 metros sobre el nivel del mar; un aumento en la compactación de los suelos en regiones con una elevada carga animal; y cambios en el pH junto con la disponibilidad de nutrientes que ocurren en momentos de mayor variabilidad climática (Buytaert et al., 2026).

La información analizada y presentada va mostrando la degradación de los suelos en la ganadería de altura vinculado con la relación con el clima y el manejo en la práctica. Dentro de esta argumentación, es preciso cuantificar la aportación aproximada de cada aspecto y en qué medida es la variabilidad climática la que puede influir para acelerar el deterioro de las propiedades de los suelos. La pregunta que este proyecto se propone responder de manera cuantitativa es: ¿Cuánto de esta degradación del suelo es provocada o acelerada por la variabilidad climática, y cuánto es el resultado del manejo del ganado?

1.5.3 La Crisis Económica: Márgenes que se Estrechan

La tercera dimensión es la más evidente para las familias ganaderas del corredor: en la última década, los márgenes de rentabilidad de la ganadería de altura del Carchi han ido disminuyendo de manera constante.

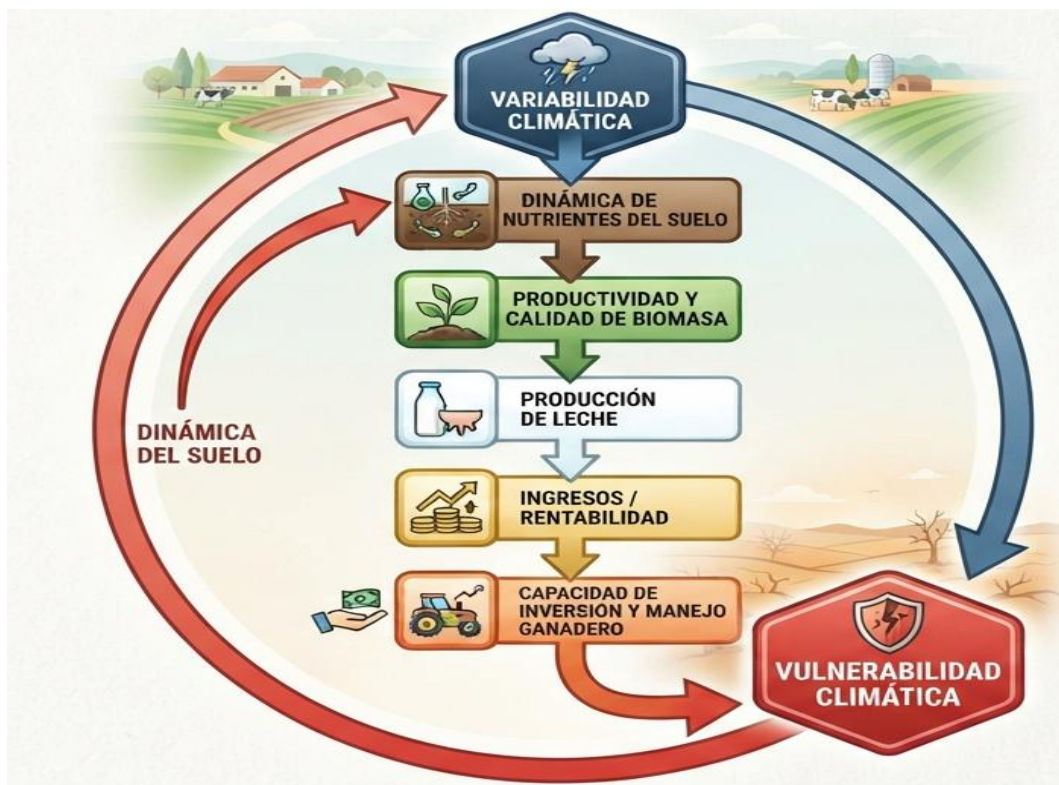
Han aumentado los costos de producción, especialmente los relacionados con la suplementación, que los ganaderos deben aumentar cuando el pasto escasea. Al mismo tiempo, el precio de la leche que reciben los productores se ha mantenido relativamente estable o ha crecido a un ritmo inferior a la inflación de los costos. Un estudio que se realizó en 532 pequeños y medianos productores de la provincia detectó que la rentabilidad, los costos de producción, el acceso al crédito y la inversión tecnológica fueron factores asociados al rendimiento económico de las unidades de producción lechera. El estudio también evidenció diferencias entre los grupos de productores, donde el costo de producción fue de aproximadamente USD 785 por hectárea al año para uno de los grupos; el ingreso de los otros productores fue por hectárea y por año de hasta USD 2.346, lo que indica una importante heterogeneidad económica dada la gran variabilidad del desempeño económico de las explotaciones (Carvajal et al., 2024)

Esto ha llevado a una disminución en la rentabilidad, lo que ha hecho que muchos ganaderos más pequeños piensen en dejar la actividad. Esta situación podría tener efectos graves, no solo para la seguridad alimentaria de la región, sino también para la conservación de los ecosistemas de páramo, que dependen en parte del uso sostenible que los productores hacen de estos paisajes (Carvajal et al., 2024).

La Triple Crisis como Sistema

El problema del corredor ganadero de altura del Carchi no se puede ver como tres crisis separadas, sino como un entramado de crisis que están interconectadas. El aumento de la variabilidad climática repercute negativamente tanto en la salud de los nutrientes del suelo como en la productividad y calidad de la biomasa, a más biomasa, más producción de leche como forma de ingresos de los ganaderos, de modo que a menor producción de leche menores ingresos para los ganaderos.

Menores ingresos, por otro lado limitan la capacidad de realizar inversiones en prácticas de manejo para mitigar la vulnerabilidad climática. Este ciclo negativo es la lógica que impulsa el proyecto de investigación. Por eso, el estudio incorpora las dimensiones climática, edáfica, productiva y económica en un único enfoque metodológico: es fundamental entenderlas todas juntas, ya que ninguna puede ser analizada de manera aislada.



1.6 Posicionamiento del Proyecto en la Literatura y la Política Agropecuaria

1.6.1 El Vacío de Investigación Integrada en los Andes Ecuatorianos

La literatura científica que aborda el impacto de la variabilidad climática en los sistemas ganaderos de los Andes es bastante fragmentada. Existen investigaciones que discuten la dinámica del nitrógeno en los suelos de páramo mediante diferentes regímenes de precipitación (Brück et al., 2023). Artículos que tratan sobre la producción de la biomasa en los pastizales especialmente en los gradientes altitudinales de los Andes ecuatorianos (Salgado et al., 2020). Además se han realizado investigaciones sobre cómo el estrés térmico afecta la producción de leche en bovinos de zonas tropicales y subtropicales.

Sin embargo, para el caso de los sistemas agropecuarios de altura del Carchi y en realidad, para ningún corredor de ganadería de alta montaña, en tierras ecuatorianas. No se identifican estudios que entrelacen las cuatro dimensiones (climática, edáfica, productiva y económica). Esa ausencia de un diseño metodológico congruente con datos primarios en el que sí podría existir una calidad suficiente limita la capacidad de formular recomendaciones argumentadas para la política agropecuaria.

Este vacío también está en la política pública. Instituciones como el MAG, el INIAP o los GAD provinciales están ya tomando decisiones sobre programas de fertilización, seguros agropecuarios, asesorías técnicas o prioridades de inversión en riesgo, aunque sin contar con datos integrados que sirvan para vincular la variabilidad climática con el deterioro del suelo y las pérdidas económicas que sufre el sector.

1.6.2 Relevancia para la Política de Adaptación al Cambio Climático

El proyecto se alinea de manera directa con la agenda de adaptación al cambio climático en Ecuador. La Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN) del país, presentada ante la CMNUCC, señala que la ganadería de altura es uno de los sectores más vulnerables al clima y que requiere atención urgente para adaptarse. El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del MAG, que abarca el período 2021–2025, tiene en cuenta la ganadería de altura en la Sierra Norte como una de sus áreas prioritarias. Sin embargo, admite que la implementación de medidas de adaptación se ve obstaculizada por la falta de información sobre la magnitud y los mecanismos del impacto climático en estos sistemas. Los resultados que se generen a partir de este proyecto aportarán los datos necesarios para que este plan evolucione

de simples declaraciones de prioridad a intervenciones concretas y efectivas en términos de costos.

1.7 Preguntas de Investigación, Hipótesis y Objetivos del Proyecto

1.7.1 La Pregunta Central

La pregunta principal que guía todo el proyecto de investigación es la siguiente: ¿En qué medida y mediante qué mecanismos influyen los factores climáticos la dinámica de los nutrientes del suelo? Y, a su vez, ¿cómo impacta esto en la producción de biomasa, la producción de leche y los ingresos económicos de los sistemas ganaderos de altura en Carchi? Además, ¿qué estrategias de manejo y políticas agropecuarias podrían ayudar a mitigar esta vulnerabilidad?

Esta pregunta central se desglosa en cinco preguntas específicas, cada una relacionada con una de las dimensiones del estudio: climática, edáfica, de biomasa, de producción de leche y económica. Las hipótesis y los objetivos específicos vinculados a cada dimensión se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.
Marco de Hipótesis y Objetivos Específicos del Proyecto de Investigación por Dimensión de Análisis

Dimensión	Hipótesis de Investigación	Objetivo Específico Correspondiente
Climática	La variabilidad de la precipitación y la temperatura en las zonas ganaderas de altura del Carchi ha mostrado una tendencia estadísticamente significativa de aumento de la variabilidad interanual en el período 2000–2024, con mayor frecuencia de eventos extremos (heladas, sequías, exceso de lluvia) desde 2010.	Caracterizar la variabilidad climática de las zonas ganaderas de altura del Carchi en el período 2000–2024, identificando tendencias, estacionalidad y eventos extremos con base en datos del INAMHI y fuentes satelitales (ERA5, CHIRPS).
Edáfica	Los factores climáticos — precipitación, temperatura y eventos extremos— explican más del 40% de la varianza en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio de los suelos ganaderos de altura del Carchi, con efectos diferenciales según el tipo de suelo y la altitud.	Cuantificar la relación entre los factores climáticos y la dinámica de nutrientes del suelo (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio disponibles) en los cuatro tipos de sistemas ganaderos identificados, mediante muestreo estacional y análisis de regresión múltiple.

Dimensión	Hipótesis de Investigación	Objetivo Específico Correspondiente
Productiva Biomasa	— La disponibilidad de nutrientes del suelo, mediada por los factores climáticos, explica más del 50% de la varianza en la productividad primaria neta de los pastizales de altura del Carchi, con efectos cualitativos sobre el contenido de proteína cruda y energía metabolizable de la biomasa.	Estimar la productividad de biomasa de los pastizales de altura del Carchi (kg MS/ha/año), su calidad nutricional y su relación con los factores climáticos y edáficos, mediante el método de jaulas de exclusión y análisis de laboratorio estacionales.
Productiva Leche	— La variabilidad climática, a través de su efecto sobre la disponibilidad de biomasa y el confort térmico animal, explica más del 35% de la varianza interanual en la producción de leche de los sistemas ganaderos de altura del Carchi, con efectos diferenciados por tipo de sistema ganadero.	Cuantificar el efecto de la variabilidad climática y la disponibilidad de biomasa sobre la producción y la calidad composicional de la leche en los cuatro tipos de sistemas ganaderos, mediante monitoreo mensual de hatos centinela durante 24 meses.
Económica	El impacto económico acumulado de la variabilidad climática sobre los sistemas ganaderos de altura del Carchi equivale a una pérdida de ingresos de entre el 15% y el 35% del ingreso potencial en años con eventos climáticos adversos, con mayor impacto proporcional sobre los sistemas de menor tecnificación.	Estimar el impacto económico de la variabilidad climática sobre los ingresos ganaderos del corredor de altura del Carchi, desagregado por tipo de sistema y por evento climático, y la construcción de escenarios económicos al 2035 y 2050 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC.

Nota. RCP: Representative Concentration Pathway (Senda de Concentración Representativa), escenarios de emisiones del IPCC. RCP 4.5: escenario de estabilización moderada de emisiones; RCP 8.5: escenario de emisiones altas (business as usual). INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador. ERA5: reanálisis climático global del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (ECMWF). CHIRPS

1.7.2 El Diseño Metodológico Integrado

El enfoque metodológico del proyecto adopto un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, longitudinal y de alcance explicativo. Se combina un análisis de datos secundarios a largo plazo, utilizando series climáticas del INAMHI y fuentes satelitales del periodo 2000 a 2024, con la recolección de datos primarios en el terreno. Esto incluye un muestreo estacional de suelos, el monitoreo de biomasa mediante jaulas de exclusión, una revisión mensual de la producción de leche en hatos centinela y encuestas económicas dirigidas a ganaderos.

El análisis econométrico de los datos integrados se realiza a través de modelos como la regresión múltiple, ecuaciones estructurales y análisis de escenarios. En el Capítulo 3 se detalla este diseño, que aborda la metodología del proyecto. El objetivo de este capítulo introductorio es establecer un marco lógico que brinde coherencia a todo el conjunto. El proyecto tiene una duración de 24 meses.

Durante la fase de recolección de datos en el campo, se abarcan dos ciclos estacionales completos, lo que permite observar la variabilidad dentro del año y entre años en variables climáticas, del suelo y de producción. Los cuatro tipos de sistemas ganaderos que se presentan en la Tabla 1.3 son los estratos del diseño muestral, con al menos 15 unidades de producción por tipo para las encuestas económicas y un mínimo de 4 hatos centinela por tipo para el monitoreo mensual de la producción de leche.

1.8 El Corredor Ganadero del Carchi como Laboratorio de la Adaptación Andina

Antes de sumergirnos en el análisis, es esencial hacer una última reflexión: el corredor ganadero de altura del Carchi no solo es el foco de este proyecto, sino también su propio laboratorio de adaptación. Un laboratorio en el absoluto sentido de la palabra: un espacio en el que la naturaleza hace su experimento, la variabilidad climática y la ciencia observa, mide, analiza e interpreta los efectos de este experimento en un sistema productivo concreto con importantes implicaciones económicas y sociales

Es decir que el clima afecta los nutrientes del suelo, cómo eso se traduce en los cambios en la biomasa y en la producción de leche, y cómo estos cambios afectan a las familias ganaderas será directamente aplicable a otros corredores ganaderos de alta montaña en Ecuador, Colombia, Perú y Bolivia.. En esos lugares, las mismas preguntas surgen y la falta de datos integrados dificulta encontrar respuestas.

El Carchi cuenta con la ventaja de tener a la UPEC, una universidad con un claro enfoque territorial, y con un equipo de investigación que ha forjado este proyecto. Además, hay una comunidad ganadera que, según las entrevistas preliminares, ha mostrado un interés notable por participar en la investigación y probar las propuestas de manejo que surjan de ella. Esa apertura es, sin duda, uno de los activos más valiosos del proyecto: la investigación agropecuaria que no se basa en la práctica y la confianza de los productores termina guardada en los estantes de las bibliotecas.

“Si puede explicarme por qué mis vacas producen menos en los años de sequía y qué puedo hacer diferente, le abriré las puertas de mi finca y le ayudaré en todo lo que necesite.” (Ganadero del Tipo II, cantón Montúfar, entrevista en profundidad, 2023).

La disposición de los ganaderos del corredor no solo representa una ventaja metodológica; es también un recordatorio poderoso de la verdadera razón de la ciencia: para responder a preguntas que importan a personas reales en contextos específicos. Este libro es la respuesta que el proyecto de investigación elabora ante esa invitación.

1.9 Síntesis del capítulo

Territorio: El corredor ganadero de altura del Carchi se sitúa entre los 2.200 y los 4.000 metros sobre el nivel del mar. Este espacio se divide en cinco zonas agroecológicas, las cuales son definidas por factores como la altitud, la temperatura, las precipitaciones y el tipo de sistema ganadero predominante. Los suelos, en su gran mayoría, son Andisoles de origen volcánico, caracterizados por su capacidad para retener agua y fijar fósforo. Además, los suelos de páramo son esenciales, actuando como importantes reservorios de carbono orgánico.

Significación económica: La actividad ganadera representa un 34,2% en la medida del PIB de la provincia de Carchi ; se producen más de un millón de litros de leche al día y genera ingresos o empleos para un 61,8 % de las familias de las zonas rurales. La actividad ganadera tiene un promedio de producción de 9,8 litros de leche por vaca y día , superando la media de leche en la Sierra ecuatoriana .

Tipología de sistemas: Se presentan cuatro tipos de sistemas ganaderos, ya que cada uno de ellos tiene alturas, tecnologías, productividades y grados de vulnerabilidad climática diferentes. El Tipo I, que es el sistema extensivo de páramo, se encuentra como el más vulnerable y con menor capacidad de adaptación. En contraste, el Tipo IV, que se destaca por ser empresarial e intensivo, es el menos vulnerable, aunque opera en las zonas de menor altitud dentro del corredor.

Problemática: Se enfrenta a una triple crisis interconectada: la creciente variabilidad climática provoca un deterioro en la dinámica de nutrientes del suelo, lo que a su vez conlleva a una reducción de la biomasa y la calidad forrajera. Esto se traduce en una menor producción de leche, ingresos más bajos y, por ende, una capacidad de inversión en adaptación reducida, aumentando así la vulnerabilidad al clima. Este ciclo vicioso es lo que la investigación busca documentar y las propuestas intentan romper.

Hipótesis y objetivos: Se plantean cinco hipótesis que abarcan las dimensiones climáticas, edáfica, de producción de biomasa, de producción de leche y económica del estudio. Además, se ha elaborado un enfoque metodológico plurimetodológico y multinivel, que considera un trabajo en el campo de 24 meses, cuatro estratos de sistemas ganaderos y al menos 15 unidades de producción por estrato.

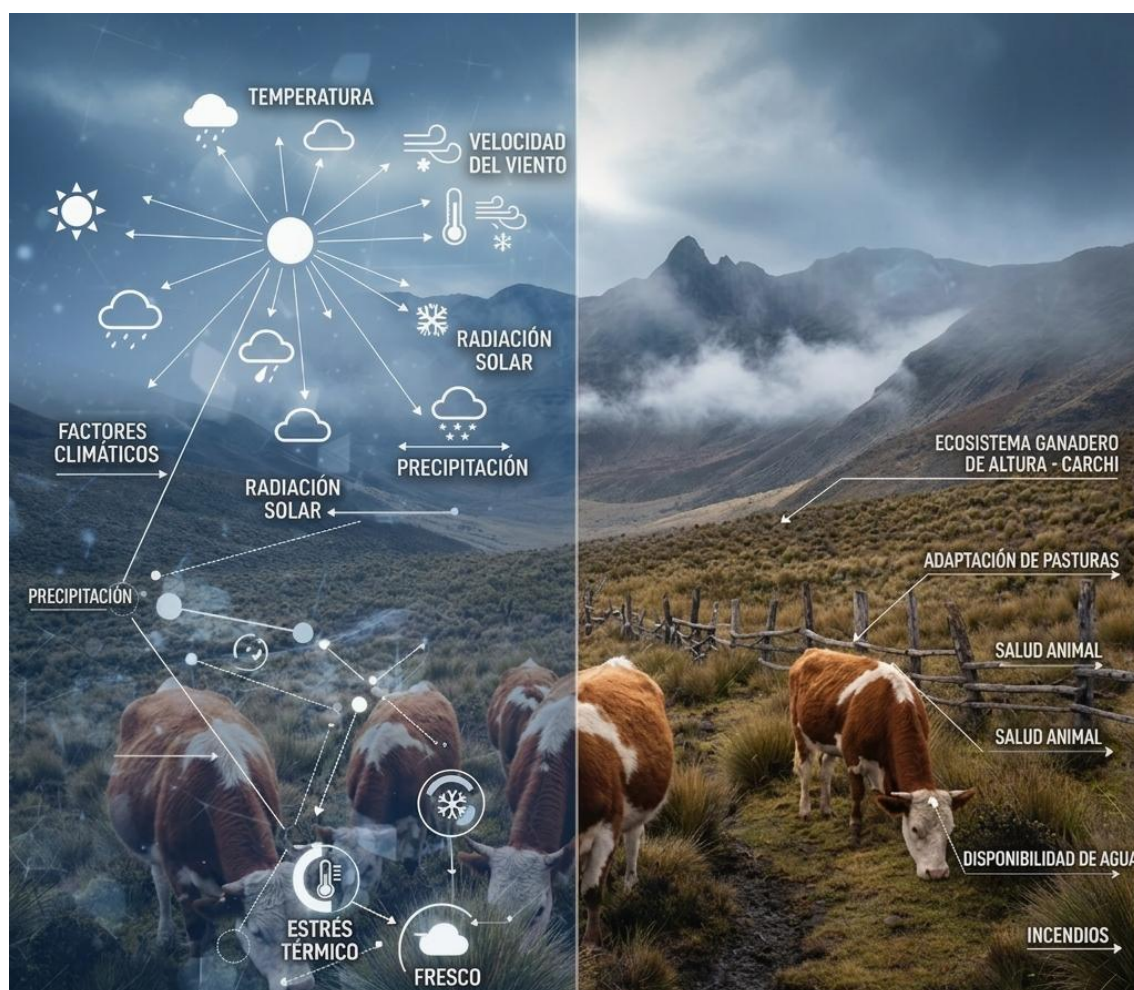
Posicionamiento: Se trata del primer estudio integrado que analiza los aspectos climáticos, edáficos, productivos y económicos de los sistemas ganaderos de altura del Carchi y que resulta de especial interés para el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del MAGA y para la CDN de Ecuador a la CMNUCC.

CAPÍTULO 2

Los Factores Climáticos en los Ecosistemas

Ganaderos de Altura: Marco Teórico y Conceptual

Variables climáticas y umbrales críticos, ciclos biogeoquímicos de nutrientes y su sensibilidad climática, el ENSO en los Andes del Carchi, el Índice THI de confort térmico animal, la cadena causal integrada clima–suelo–biomasa–leche y los marcos teóricos de referencia del proyecto



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

Identificar las siete variables climáticas principales que determinan el funcionamiento de los ecosistemas ganaderos de altura y sus rangos óptimos y umbrales críticos para la producción de pastizales en los Andes ecuatorianos.

- **Explicar** los mecanismos por los cuales los factores climáticos —temperatura, precipitación, radiación solar y heladas— afectan la actividad microbiana del suelo y, a través de ella, la disponibilidad de los nutrientes esenciales para la producción de biomasa de pastizal.
- **Describir** los ciclos biogeoquímicos de los cinco nutrientes fundamentales de los pastizales de altura, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio-magnesio y azufre y considerando las diferencias en su respuesta frente a las condiciones climáticas.
- **Analizar** el fenómeno ENSO (El Niño–Oscilación del Sur) como primordial modulador de la variabilidad climática interanual en Carchi, con sus causas diferenciados acerca del suelo, la biomasa y la economía ganadera en sus cuatro etapas.
- **Aplicar** el Índice de Temperatura–Humedad (THI) como instrumento de cuantificación del estrés calórico acerca de la producción bovina de leche en los sistemas ganaderos de altura del Carchi.
- **Construir** la cadena causal integrada clima–suelo–biomasa–leche–economía como el modelo conceptual que guía el diseño metodológico y el análisis de resultados del proyecto, identificando los siete eslabones de la cadena y sus mecanismos de transmisión.
- **Relacionar** los seis marcos teóricos que sustentan la investigación con varios capítulos e interpretación del libro, identificando la forma en que cada uno aporta a analizar los casos estudiados.

2.1 Introducción: El Clima como Regulador del Ecosistema Ganadero

La producción agropecuaria, en su esencia, se basa en la transformación de la energía solar y el agua en biomasa. Este hecho es similar a la ganadería de altura, que convierte la luz del sol y las lluvias a través del mismo suelo, la microflora que hay en él, las plantas y su fisiología, los animales y su metabolismo en litros de leche y kilos de carne.

Para entender cómo opera la ganadería de altura en el Carchi, es fundamental analizar los mecanismos que hacen que el clima influya en la disponibilidad de recursos básicos: agua,

calor y luz. Estos recursos son los que inician la cadena de transformaciones que va desde los nutrientes en el suelo hasta la proteína que encontramos en un litro de leche.

Este capítulo establece el marco teórico y conceptual que respalda el proyecto de investigación. No se trata de un simple resumen de hallazgos de otros, como se verá en el Capítulo 3, que aborda el estado del arte. En cambio, aquí se presentan los conceptos, las relaciones causales y los marcos teóricos necesarios para que el proyecto pueda formular sus hipótesis con precisión, diseñar su metodología de manera rigurosa y analizar los resultados con la profundidad que el problema exige.

El capítulo está estructurado alrededor de la cadena causal que forma el núcleo conceptual del libro: clima → temperatura y humedad del suelo → actividad microbiana → disponibilidad de nutrientes → producción y calidad de biomasa → producción y calidad de leche → ingreso económico. Cada sección del capítulo aborda uno o más eslabones de esta cadena, y al final, la Tabla 2.4 resume todo el recorrido teórico de manera clara.

2.2 El Clima Andino de Altura: Variables, Rangos Óptimos y Umbrales Críticos

2.2.1 La Especificidad del Clima Tropical de Altura

El clima de los Andes tropicales, en altitudes que oscilan entre 2.200 y 4.000 metros sobre el nivel del mar, presenta características que lo distinguen claramente de cualquier otra región del mundo en latitudes más templadas o frías. En esta área, la estacionalidad se define principalmente por la cantidad de precipitación, en lugar de por la temperatura.

A diferencia de lo que ocurre en los sistemas ganaderos de Europa o del Cono Sur, donde los inviernos fríos marcan el tiempo de escasez de forraje, en los Andes ecuatorianos la estación lluviosa, que coincide con el invierno, es el momento de mayor productividad del pasto, mientras que el verano, o la estación seca, se convierte en un periodo de gran estrés.

Las heladas son un riesgo constante durante todo el año en altitudes superiores a los 3.200 metros, sin una previsibilidad estacional como la que se observa en latitudes más templadas. Además, la temperatura promedio mensual apenas varía entre 2 y 4 grados Celsius entre el mes más frío y el más cálido, pero las temperaturas diarias pueden fluctuar entre 15 y 20 grados Celsius desde la madrugada hasta el mediodía.

Esta singularidad climática tiene efectos directos en la dinámica de los ecosistemas ganaderos. Los procesos que tienen lugar en el suelo, la mineralización, la nitrificación y la actividad enzimática responden en toda su extensión a la variabilidad diaria de la temperatura del suelo ya la variabilidad anual de la precipitación y no a una clara estacionalidad térmica,

Lo que hace más compleja la relación entre clima, suelo y planta a los Andes tropicales, haciéndola más compleja y más difícil de modelar que los sistemas ganaderos de latitudes templadas. Esta complejidad es, en parte, la razón detrás de la escasez de estudios integrados que se mencionan en el Capítulo 3.

2.2.2 Las Siete Variables Climáticas Críticas y sus Umbrales

La Tabla 2.1 presenta de manera ordenada las siete variables climáticas más importantes para los ecosistemas ganaderos de altura en el Carchi. Incluye también los rangos óptimos que se han registrado para los pastizales andinos, así como los límites críticos y los impactos que se producen en el ecosistema cuando se sobrepasan esos límites.

Tabla 5.

Variables Climáticas Críticas para los Ecosistemas Ganaderos de Altura de los Andes Ecuatorianos: Rangos Óptimos, Umbrales y Efectos sobre el Ecosistema

Variable Climática	Rango Óptimo para Pastizales de Altura (Andes tropicales)	Umbrales Críticos	Efectos sobre el Ecosistema Ganadero cuando se Supera el Umbral
Temperatura media del aire (°C)	10 – 18 °C para gramíneas de altura (kikuyo, fescue); 8–15 °C para leguminosas (trébol)	< 5 °C (inhibición del crecimiento vegetal); < 0 °C (helada que destruye tejido foliar); > 22 °C (estrés calórico incipiente en vacas Holstein en altura)	Heladas: destrucción del tejido foliar, reducción de 20–60% en biomasa disponible y deterioro de calidad proteica. Temperaturas altas: reducción del consumo voluntario de forraje, aumento del Índice Temperatura-Humedad (THI) y disminución de producción de leche hasta 15%.
Precipitación total anual (mm)	900 – 1.400 mm/año con distribución bimodal regular; humedad aprovechable mínima de 400–600 mm/año	< 400 mm/año en suelos de alto drenaje: déficit hídrico severo; > 1.800 mm/año con mala distribución: encharcamiento, anaerobiosis del suelo, putrefacción radicular	Déficit hídrico: cierre estomático, paralización del crecimiento de pasto, reducción de biomasa de hasta 45% en año El Niño. Exceso: saturación del suelo, lixiviación de N y K, inhibición de mineralización microbiana, compactación acelerada bajo pastoreo.

Variable Climática	Rango Óptimo para Pastizales de Altura (Andes tropicales)	Umbrales Críticos	Efectos sobre el Ecosistema Ganadero cuando se Supera el Umbral
Distribución e intensidad de la lluvia (mm/evento)	Lluvias frecuentes de baja intensidad (5–20 mm/evento); regularidad bimodal con dos períodos secos < 60 días	Eventos > 50 mm/día: erosión superficial y lixiviación acelerada de nutrientes; períodos secos > 45 días consecutivos en zonas > 3.000 msnm: estrés hídrico severo del pastizal	Erosión hídrica: pérdida de los primeros 5–10 cm de suelo (horizonte A, el más fértil y orgánico). Lixiviación: pérdida del 25–40% del N mineral disponible en un evento de lluvia intensa sobre suelo sin cobertura vegetal.
Radiación solar global (MJ/m²/día)	14 – 20 MJ/m ² /día para fotosíntesis óptima de gramíneas C3 de altura	< 10 MJ/m ² /día por > 15 días consecutivos (nubosidad persistente): fotosíntesis limitada; > 24 MJ/m ² /día en zonas de páramo sin cobertura vegetal: estrés hídrico de la hoja	Baja radiación: reducción de la tasa fotosintética, menor producción de biomasa y menor contenido de carbohidratos solubles de reserva en las raíces. Alta radiación con déficit hídrico: estrés combinado que puede reducir la biomasa hasta en 35%.
Temperatura del suelo (°C)	12 – 20 °C para mineralización activa de la materia orgánica (actividad óptima de microorganismos del suelo)	< 8 °C: inhibición severa de la actividad microbiana, paralización de la nitrificación; > 25 °C: mayor mineralización, pero también mayor volatilización de N y deshidratación del suelo	Bajas temperaturas: reducción de hasta 80% en la tasa de mineralización del N, disminución de la disponibilidad de P y K por menor actividad de fosfatasas y rizosfera. Altas temperaturas: mayor mineralización, pero pérdida por volatilización; balance neto negativo en suelos con poca cobertura.
Heladas (número de eventos/año y severidad)	< 5 eventos de helada leve (< –2 °C) por año en zonas ganaderas productivas	Heladas moderadas: –2 a –5 °C; heladas severas: < –5 °C; ocurrencia en meses fuera del período histórico normal (heladas anómalas)	Heladas moderadas: daño foliar del 30–50% del pastizal; recuperación en 3–6 semanas. Heladas severas: daño del 70–100%; recuperación en 6–12 semanas o necesidad de resiembra. Heladas anómalas en meses de alta lactancia: impacto económico máximo por coincidencia con pico productivo.

Variable Climática	Rango Óptimo para Pastizales de Altura (Andes tropicales)	Umbrales Críticos	Efectos sobre el Ecosistema Ganadero cuando se Supera el Umbral
Humedad relativa del aire (%)	65 – 85% para balance hídrico foliar óptimo en gramíneas de altura	< 50% con viento: estrés evapotranspirativo que supera la capacidad de regulación estomática; > 90% persistente: proliferación de hongos foliares (roya, mancha ocular) en pastizales	Baja humedad: aumento de la demanda evapotranspirativa, mayor estrés hídrico del suelo incluso con precipitación normal. Alta humedad persistente: enfermedades fúngicas de pastizales que pueden reducir la biomasa útil en 20–35% y deteriorar su calidad nutricional.

Nota. THI: Temperature Humidity Index (Índice Temperatura–Humedad), desarrollado por Thom (1959) para cuantificar el estrés calórico en bovinos; se calcula como $THI = Tbs - 0,55 \times (1 - HR/100) \times (Tbs - 14,5)$, donde Tbs es la temperatura de bulbo seco en °C y HR la humedad relativa en %. PPNA

2.2.3 La Temperatura del Suelo como Variable Mediadora

Una distinción teórica importante que a menudo se pasa por alto en la literatura agropecuaria es la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del suelo. La temperatura del suelo en los primeros 30 centímetros es la que influye directamente en la actividad de los microorganismos, la velocidad de descomposición de la materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo de las raíces.

Por otro lado, la temperatura del aire es la que los ganaderos sienten y la que registran las estaciones meteorológicas. Sin embargo, su impacto en la producción del pastizal depende, en gran parte, de cómo se ve afectada la temperatura del suelo.

En los Andisoles del corredor ganadero del Carchi, la vegetación de los pastizales actúa como un amortiguador térmico. Esto significa que ayuda a suavizar las variaciones extremas de la temperatura del aire, manteniendo la temperatura del suelo dentro de un rango más estable. Por ejemplo, un pastizal bien cubierto puede sostener la temperatura del suelo entre 10 y 18 °C, incluso cuando el aire se enfría a 2-4 °C en las primeras horas de la mañana.

Por el contrario, un suelo desnudo, ya sea por sobrepastoreo, heladas que destruyen la vegetación o degradación, sufre fluctuaciones de temperatura drásticas. Estas variaciones

extremas pueden inhibir la actividad de los microorganismos y afectar negativamente la estructura del suelo.

Entender este mecanismo es crucial para comprender por qué una buena gestión del pastizal no solo es una estrategia productiva, sino también una estrategia para adaptarse al cambio climático.

2.3 Ciclos Biogeoquímicos de Nutrientes y su Sensibilidad a los Factores Climáticos

2.3.1 Los Andisoles como Matriz Biogeoquímica

Los Andisoles del corredor ganadero del Carchi son, desde una perspectiva biogeoquímica, suelos de increíble complejidad y delicadeza. Gracias a su alto contenido de allofane y a los materiales amorfos de origen volcánico, tienen una notable capacidad para adsorber fosfatos y materia orgánica, algo que otros tipos de suelos no pueden igualar en la misma medida.

Estos suelos pueden retener entre 1.500 y 3.000 mg de P/kg, pero principalmente en formas que las plantas no pueden utilizar. Esta característica convierte la falta de fósforo disponible en el problema nutricional más común de los pastizales de la región, aun cuando el total de fósforo en el suelo sea alto.

Además, su gran porosidad y capacidad para retener agua los hacen muy sensibles a los cambios en el suministro de agua. Responden de inmediato a lluvias intensas, provocando la lixiviación de bases, y cuando hay déficit hídrico, experimentan alteraciones en la actividad enzimática que pueden persistir durante semanas, incluso después de que la humedad vuelva a la normalidad.

Tabla 6.

Ciclos Biogeoquímicos de los Nutrientes Principales en Pastizales de Altura de los Andes Ecuatorianos: Procesos, Sensibilidad Climática y Efectos sobre la Producción

Nutriente	Proceso Biogeoquímico Principal en Pastizales de Altura	Sensibilidad a los Factores Climáticos	Efecto sobre la Producción de Biomasa y Leche cuando el Clima Altera el Ciclo
Nitrógeno (N)	Mineralización de la materia orgánica del suelo por bacterias heterótrofas (proceso dominante en Andisoles ricos en N	Altamente sensible: la tasa de mineralización se duplica por cada 10 °C de aumento de temperatura ($Q_{10} \approx 2,0-2,5$); la lixiviación	Déficit de N disponible: reducción del contenido de proteína cruda del pasto (de 18–22% a 8–12% en meses críticos), disminución de la tasa de crecimiento foliar, menor

Nutriente	Proceso Biogeoquímico Principal en Pastizales de Altura	Sensibilidad a los Factores Climáticos	Efecto sobre la Producción de Biomasa y Leche cuando el Clima Altera el Ciclo
	orgánico); nitrificación ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$); fijación biológica de N_2 por leguminosas y microorganismos de vida libre.	de NO_3^- aumenta exponencialmente con la intensidad de la precipitación; las heladas paralizan la nitrificación durante semanas.	relación hoja:tallo; en la leche: reducción del contenido de proteína láctea y de la producción total.
Fósforo (P)	Mineralización de P orgánico por fosfatasa microbianas; liberación de P inorgánico desde la fracción adsorbida en óxidos de Al y Fe (dominante en Andisoles). El P disponible es la fracción más pequeña y crítica del ciclo en estos suelos.	Moderadamente sensible; la actividad de fosfatasa disminuye con temperaturas $< 10^\circ\text{C}$; el encharcamiento (exceso de lluvia) favorece la reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} y libera P adsorbido (efecto paradójico); el secado y re-humectación del suelo crea pulsos de disponibilidad de P.	Déficit de P disponible (< 10 ppm en Andisoles): limitación del crecimiento radicular y de la colonización micorrízica, reducción de la tasa fotosintética, menor digestibilidad de la materia seca; en el animal: menor eficiencia de utilización del N para síntesis proteica, reducción de la producción de leche.
Potasio (K)	El K existe principalmente en formas intercambiables y en solución; es el catión más móvil del suelo y el de mayor riesgo de lixiviación. La mineralización del K desde la materia orgánica es rápida y poco dependiente de la actividad microbiana.	Alta sensibilidad a la lixiviación: un evento de lluvia de 50 mm sobre suelo sin cobertura puede lixiviar el 30–50% del K intercambiable de los primeros 20 cm; la temperatura influye menos que en el N y P, pero la alternancia de sequía-lluvia acelera la lixiviación.	Déficit de K ($< 0,2$ cmol/kg): reducción de la turgencia celular del pasto, menor resistencia al estrés hídrico y a las heladas, disminución del contenido de energía metabolizable; en la vaca: hipopotasemia subclínica asociada a reducción del consumo de MS y de la producción de leche, con efectos sobre la reproducción.
Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)	El Ca y Mg existen en formas intercambiables, en la solución del suelo y en minerales primarios; su disponibilidad está fuertemente controlada por el pH del suelo. Los Andisoles del Carchi tienen generalmente	Moderadamente sensibles: el pH del suelo disminuye con la acidificación progresiva bajo lluvias intensas (lixiviación de bases); la mayor mineralización de la materia orgánica a temperaturas altas libera Ca y Mg pero también acidifica por la	Deficiencia de Mg ($< 0,5$ cmol/kg) en pastizales de altura: hipomagnasemia (tetania de los pastos) en vacas en alta producción, especialmente en primavera cuando el pasto joven tiene alta relación $\text{K}/(\text{Ca}+\text{Mg})$; mortalidad aguda posible en casos severos; deficiencia subclínica crónica: reducción

Nutriente	Proceso Biogeoquímico Principal en Pastizales de Altura	Sensibilidad a los Factores Climáticos	Efecto sobre la Producción de Biomasa y Leche cuando el Clima Altera el Ciclo
	niveles adecuados de Ca pero frecuente deficiencia de Mg.	producción de ácidos orgánicos.	de 5–10% en producción de leche.
Azufre (S) y Micronutrientes (Zn, Cu, Mo, B)	El S proviene principalmente de la mineralización de la materia orgánica (proceso lento en suelos fríos) y de la deposición atmosférica. Zn, Cu y Mo están controlados por la adsorción en óxidos de Fe-Al y por el pH; son esenciales para la actividad enzimática del suelo.	El S es altamente sensible a la temperatura del suelo: su mineralización se paraliza por debajo de los 8 °C. El Zn y Cu tienen mayor disponibilidad a pH bajo (< 5,5) y menor a pH alto; las fluctuaciones climáticas que alteran el pH del suelo alteran su disponibilidad.	Deficiencia de S: limitación de la síntesis de aminoácidos azufrados (metionina, cisteína) en el pasto, reducción de la calidad proteica y de la digestibilidad; en la leche: menor contenido de caseína. Deficiencia de Zn y Cu: menor actividad de superóxido dismutasa y metaloproteínas en el animal, mayor susceptibilidad a enfermedades, reducción de la eficiencia reproductiva.

Nota. Elaboración propia.

2.3.2 El Nitrógeno como el Nutriente de Mayor Relevancia Productiva

De los cinco nutrientes mencionados en la Tabla 2.2, el nitrógeno (N) destaca como el más importante para la productividad en los pastizales del corredor ganadero del Carchi. Esto se debe a tres razones clave: primero, es el principal factor que influye en el contenido de proteína cruda del pasto, el cual es el indicador nutricional más directamente ligado a la producción de leche. Segundo, el nitrógeno es el nutriente que más se ve afectado por la variabilidad climática, sobre todo por cambios en la temperatura y la cantidad de lluvia. Y, en tercer lugar, es el nutriente más costoso de reponer cuando la mineralización natural no es suficiente.

El ciclo del N en los Andisoles de este corredor ganadero tiene una particularidad que lo hace muy susceptible a las variaciones climáticas. En cualquier momento, la cantidad de N disponible para las plantas es solo una pequeña fracción (entre el 1% y el 5%) del N total presente en el suelo, que está mayormente en formas orgánicas estables. La cantidad de esta pequeña fracción que se puede utilizar depende de la actividad de los microorganismos que mineralizan, los cuales responden de manera no lineal a la temperatura y humedad del suelo. Un evento climático extremo –ya sea una helada fuerte, una sequía prolongada o una lluvia intensa– puede limitar o incluso eliminar la disponibilidad de N mineral por períodos de entre

dos a ocho semanas, afectando de inmediato el crecimiento del pastizal y, a mediano plazo, la producción de leche.

2.3.3 La Paradoja del Fósforo en los Andisoles

El fósforo (P) presenta en los Andisoles del Carchi lo que la literatura denomina la paradoja del fósforo en suelos andinos: estos suelos tienen frecuentemente contenidos totales de P de 1.000–3.000 mg/kg —mucho mayores que los suelos de otras regiones— pero contenidos de P disponible de apenas 5–15 ppm (método Olsen), muy por debajo del umbral de suficiencia para pastizales de 20–25 ppm. La causa es la alta capacidad de adsorción de los minerales amorfos del suelo, que fija el P en formas no extractables por las raíces. La variabilidad climática exacerba este problema de dos maneras: los períodos fríos reducen la actividad de las fosfatasas microbianas que liberan P orgánico, y los períodos de encharcamiento pueden producir pulsos de disponibilidad de P por reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} expulsando P adsorbido igualados de reabsorción cuando el suelo se oxigena. Estos pulsos son difícilmente aprovechables por las raíces y pueden representar pérdidas netas de P por lixiviación.

2.4 Variabilidad

d Climática versus Cambio Climático: Una Distinción Conceptual Necesaria

2.4.1 Definiciones Operativas

En el marco de este proyecto de investigación, es fundamental aclarar la diferencia entre dos conceptos que a menudo se confunden en la literatura agropecuaria y en las conversaciones sobre políticas: la variabilidad y el cambio climáticos.

La variabilidad climática se refiere a las oscilaciones naturales del clima en torno a sus valores promedio históricos, ocurriendo en escalas de tiempo de años a décadas, sin un cambio consistente en la media o en la varianza. En los Andes ecuatorianos, este fenómeno está marcado por el ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), que ocasiona años más secos o húmedos que lo habitual, con ciclos irregulares que ocurren cada 2 a 7 años.

Los ganaderos del corredor del Carchi han vivido con esta variabilidad a lo largo de generaciones y han creado estrategias, tanto formales como informales, para manejarla.

Por otro lado, el cambio climático se refiere a las tendencias sistemáticas en los valores promedio o en la varianza del clima que se mantienen durante décadas y que están vinculadas al aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. En las montañas de los Andes

en Ecuador , se da el calentamiento global en primer lugar como una media de temperatura mayor (0,2 a 0,4 ° C por década en los últimos 40 años o más) y el deshielo de los glaciares que controlan los flujos de agua en las cuencas altas , y además viene acompañado de una mayor variabilidad climática . Con esto se hace referencia a que el fenómeno menor de El Niño y la Niña se dan y se producen a mayor intensidad y que las longitudes de tiempo entre ellos son más cortas , lo que intensifica la variabilidad natural que los ganaderos ya conocían .2.4.2 Por qué Esta Distinción Importa para el Diseño del Proyecto

La diferencia entre la variabilidad y el cambio climáticos es crucial para el diseño del proyecto por dos motivos principales.

En primer lugar, la escala temporal del análisis de proyecto se centra en la variabilidad climática interanual observada entre 2000 y 2024. Este periodo es lo suficientemente extenso como para capturar varios ciclos completos del fenómeno ENSO, pero no es lo suficientemente largo para distinguir de manera clara las tendencias del cambio climático de la variabilidad natural.

En segundo lugar, las implicaciones para la adaptación son significativas: las estrategias para adaptarse a la variabilidad climática actual —que ya presenta altos niveles— son distintas de las que se necesitarán para afrontar el cambio climático que se prevé para el 2050, aunque muchas de ellas pueden complementarse entre sí.

El proyecto aborda ambas dimensiones: la variabilidad climática actual en los Capítulos 4 a 11, y el cambio climático que se proyecta para el futuro en el Capítulo 12.

2.5 El Fenómeno ENSO y su Expresión en el Corredor Ganadero del Carchi

2.5.1 El ENSO como Modulador Dominante de la Variabilidad Interanual

En los Andes tropicales del norte de Ecuador, el fenómeno conocido como ENSO (El Niño–Oscilación del Sur) juega un papel crucial en la variabilidad climática de año a año.

A diferencia de lo que ocurre en los Andes centrales, que abarcan Perú y Bolivia, donde El Niño tiende a estar vinculado a una reducción de las lluvias, en Ecuador la relación entre ENSO y precipitación es mucho más compleja y varía según la región.

Por ejemplo, la costa ecuatoriana puede llegar a tener lluvias muy intensas en los años de El Niño. Este fenómeno ha sido capaz de provocar desbordamientos y otras catástrofes en el litoral, tal como lo evidencian los años 1997 - 1998 y 2015–2016. En cambio, en la Sierra, que incluye el Carchi, la cosa es bien distinta: hay poca agua y mucho calor durante El Niño y hay más agua y temperaturas más frescas durante la Niña .

Tabla 7.

El Fenómeno ENSO y su Expresión en el Corredor Ganadero de Altura del Carchi: Fases, Efectos Climáticos, Edáficos y Económicos

Fase del ENSO	Expresión Climática en el Carchi y los Andes del Norte	Efecto sobre el Suelo y la Biomasa Ganadera	Impacto Económico Documentado en el Sector Lechero del Carchi
El Niño moderado (ONI: 0,5 – 1,4 °C)	Temperatura 0,5–1,0 °C por encima del promedio histórico. Precipitación reducida 10–25% en las zonas altas del Carchi (> 3.000 msnm). Reducción de la cobertura nubosa y aumento de la radiación solar.	Aumento modesto de la mineralización de N (efecto positivo temporal). Reducción de la humedad del suelo: menor disponibilidad de P y K. Biomasa reducida en 8–15% respecto al año promedio. Calidad del pasto ligeramente superior por mayor radiación solar.	Reducción estimada del ingreso ganadero del 5–12% en fincas del Tipo I y II. Aumento del gasto en suplementación de 15–20%. Efecto neto negativo para la mayoría de los productores del corredor.
El Niño fuerte (ONI: > 1,5 °C)	Temperatura 1,5–2,5 °C por encima del promedio histórico. Precipitación reducida 30–50% en zonas altas. Períodos secos de 40–70 días. Mayor frecuencia de heladas nocturnas por mayor irradiación nocturna.	Déficit hídrico severo: paralización del crecimiento del pasto por 4–8 semanas. Aumento de la mineralización de N seguido de pérdida por volatilización. Biomasa reducida en 30–50%. Deterioro severo de la calidad del pasto: proteína cruda cae de 18% a 8–10%.	Reducción del ingreso ganadero del 25–45%. Pérdida de peso de los animales por subalimentación. Aumento de mortalidad (especialmente en terneros). Endeudamiento de los ganaderos del Tipo I y II para cubrir costos de suplementación. Evento El Niño 2015–2016: pérdidas estimadas USD 3.200–5.400 por finca en el Carchi.
La Niña moderada (ONI: –0,5 a –1,4 °C)	Temperatura 0,3–0,8 °C por debajo del promedio histórico. Precipitación aumentada 15–30% en zonas altas. Mayor nubosidad	Suelos saturados en períodos prolongados: lixiviación de N y K, reducción de la mineralización del P, mayor riesgo de enfermedades fúngicas en el pastizal. Biomasa	Efecto paradójico: mayor biomasa pero de menor calidad. Reducción de la producción de leche por menor digestibilidad del pasto. Aumento de la incidencia de mastitis y enfermedades podales asociadas a suelos encharcados. Impacto

Fase del ENSO	Expresión Climática en el Carchi y los Andes del Norte	Efecto sobre el Suelo y la Biomasa Ganadera	Impacto Económico Documentado en el Sector Lechero del Carchi
	persistente. Reducción de la amplitud térmica diaria.	moderadamente aumentada en cantidad pero reducida en calidad energética (menor contenido de carbohidratos solubles por menor radiación solar).	económico neto: -8% a -15% del ingreso.
La Niña fuerte (ONI: < -1,5 °C)	Temperatura 1,0–1,5 °C por debajo del promedio histórico. Precipitación aumentada 35–60% en zonas altas. Períodos de lluvia continua de 20–35 días. Heladas más frecuentes y de mayor intensidad por mayor humedad atmosférica.	Encharcamiento severo y persistente: anaerobiosis del suelo, pérdida masiva de N por desnitrificación, movilización de metales pesados. Daño mecánico al pastizal por pisoteo sobre suelo saturado. Biomasa de muy baja calidad nutricional. Proliferación de plantas no palatables y tóxicas.	Pérdidas del 20–35% del ingreso ganadero. Mayor mortalidad por hipotermia y por enfermedades asociadas al frío y la humedad. Daño permanente a la estructura del suelo que tarda 2–4 años en recuperarse. Abandono temporal de potreros. Evento La Niña 2010–2012: las pérdidas más severas del sector ganadero carchense en los últimos veinte años.
Fase neutra del ENSO	Temperatura y precipitación dentro del rango histórico normal. Distribución bimodal regular. Amplitud térmica diaria normal (8–12 °C en zonas medias; 12–18 °C en páramo).	Condiciones óptimas para la mineralización de N (temperatura moderada + humedad adecuada). Disponibilidad normal de todos los nutrientes. Biomasa en el rango histórico de productividad (base 100).	Producción de leche en el rango histórico normal para cada tipo de sistema. Ingresos ganaderos en línea con los promedios de mediano plazo. Los años de fase neutra son el referente para cuantificar el impacto de los años El Niño y La Niña.

Nota.. Elaboración propia con base en Vuille et al. (2018); INAMHI (2023); NOAA (2024).

2.5.2 La Huella del ENSO en la Producción de Leche del Carchi

Los registros históricos de la producción de leche en Carchi (INEC, ESPAC 2005–2023) revelan una clara señal de ENSO. En los años de El Niño fuerte, como 2009–2010 y 2015–2016, la producción provincial de leche experimentó caídas de entre el 8% y el 18%. Por otro lado, durante los años de La Niña fuerte (2010–2012), aunque las reducciones fueron menores,

se registraron descensos estadísticamente significativos de entre el 5% y el 12%. Esto concuerda con la causa paradójico que se evidencia en la tabla 7 donde se observa mas biomasa.

Esta señal de ENSO en la producción de leche se presenta como uno de los indicadores más directos de cómo la variabilidad climática impacta de manera económica y tangible en el sector ganadero. Es, sin duda, la justificación empírica más contundente para el proyecto de investigación en curso.

Lo crucial aquí es que la señal de ENSO en la producción de leche no se traduce únicamente en una reducción proporcional de la biomasa. Más bien, se presenta como una disminución acentuada debido a una cadena de efectos que incluye la calidad nutricional del pasto, el confort térmico de los animales, y los costos de suplementación que los ganaderos deben afrontar para mantener la producción. Esta amplificación representa la cadena causal que se desarrolla en este capítulo, y su cuantificación es uno de los objetivos principales del proyecto.

2.6 El Estrés Térmico en Bovinos de Altura: El Índice THI

2.6.1 El Confort Térmico como Variable Mediadora entre el Clima y la Producción de Leche

La influencia de la temperatura en la producción de leche de vacas no se limita solo al efecto sobre el pasto —es decir, la disminución en la cantidad y calidad de la biomasa— sino que también se da a través de un impacto directo en el metabolismo de los animales: el estrés por calor.

Las vacas Holstein y sus cruces, que son las más comunes en los sistemas de ganadería más productivos del corredor del Carchi, son especialmente vulnerables al calor. Esto se debe a que su alta producción de leche genera una gran cantidad de calor metabólico que necesita ser disipado para mantener su temperatura corporal dentro del rango normal de 38,5–39,5 °C.

El Índice de Temperatura-Humedad (THI), que fue desarrollado originalmente por Thom en 1959 y luego adaptado para las vacas lecheras por Johnson en 1985 y revisado por Armstrong en 1994, es la herramienta estándar utilizada para medir el nivel de estrés por calor que enfrentan estos animales según las condiciones ambientales. Su cálculo se realiza de la siguiente manera:

Fórmula del Índice THI

$$\text{THI} = \text{Tbs} - 0,55 \times (1 - \text{HR}/100) \times (\text{Tbs} - 14,5)$$

Donde Tbs = temperatura de bulbo seco (°C) y HR = humedad relativa (%)

Interpretación: THI < 68: sin estrés calórico; THI 68–72: estrés leve (reducción de la producción de leche de 5–10%); THI 72–80: estrés moderado (reducción 10–25%); THI > 80: estrés severo (reducción > 25%, riesgo de mortalidad).

2.6.2 El THI en el Contexto de Altura del Carchi

Un aspecto curioso del THI en el contexto de los sistemas ganaderos de altura del Carchi es que, a pesar de las bajas temperaturas promedio del corredor (que oscilan entre 10 y 16 °C en las áreas con mayor actividad ganadera), el THI puede llegar a niveles de estrés leve durante las horas de intensa radiación solar en los valles interandinos (a altitudes entre 2.200 y 2.600 msnm).

Esto es especialmente notorio en los meses de verano, de diciembre a marzo, cuando la temperatura al mediodía puede superar los 20-22 °C, acompañada de una humedad relativa del 70-80%.

En las zonas de páramo alto, que están por encima de los 3.200 msnm, el THI generalmente se mantiene por debajo del umbral de estrés. Esto indica que el principal desafío climático para la producción de leche en estas áreas no es el estrés térmico que sufren los animales, sino más bien la disminución en la cantidad y calidad de la biomasa disponible.

Esta diferencia en la altitud, y el mecanismo de impacto climático predominante, es importante desde un punto de vista teórico porque sugiere que las mejores estrategias de adaptación varían entre las zonas más bajas del corredor, donde la prioridad es el manejo del confort térmico de los animales, y las áreas más altas, donde lo esencial es la gestión de la disponibilidad y calidad del pasto.

El diseño del proyecto refleja esta variabilidad al estratificar los sistemas ganaderos según la altitud, basándose en los cuatro tipos de la Tipología del Capítulo 1.

2.7 La Cadena Causal Integrada: Clima → Suelo → Biomasa → Leche → Economía

2.7.1 El Modelo Conceptual del Proyecto

En los apartados anteriores, se ha analizado de manera detallada y por partes cómo se relacionan los factores climáticos con los resultados productivos y económicos de los sistemas ganaderos de altura en Carchi.

La Tabla 2.4 resume estos mecanismos dentro de una cadena causal integrada que forma el núcleo del modelo conceptual del proyecto. Se presenta como una secuencia de siete eslabones, cada uno con sus propias variables de entrada y salida, además de su correspondiente mecanismo de transmisión, ya sea biofísico o económico.

Tabla 8.

La Cadena Causal Integrada Clima–Suelo–Biomasa–Leche–Economía: Siete Eslabones, Mecanismos de Transmisión y Marcos Teóricos

Eslabón de la Cadena Causal	Variable de Entrada (Causa)	Variable de Salida (Efecto)	Mecanismo Biofísico o Económico de Transmisión y Teoría de Referencia
Eslabón 1: Clima → Temperatura del suelo	Temperatura media del aire; radiación solar neta; cobertura del suelo.	Temperatura del suelo (0–30 cm); amplitud térmica del suelo.	Transferencia de calor por conducción y convección entre la atmósfera y el suelo; modulada por la cobertura vegetal (efecto buffer de la pradera). Teoría: termodinámica del suelo (Campbell y Norman, 1998).
Eslabón 2: Clima → Humedad del suelo	Precipitación total, distribución e intensidad; evapotranspiración potencial (función de T, HR, viento y Rn).	Humedad volumétrica del suelo; potencial hídrico del suelo; déficit hídrico.	Balance hídrico del suelo: entradas (lluvia + escorrentía subsuperficial) – salidas (evapotranspiración + drenaje profundo + escorrentía superficial). El potencial hídrico del suelo determina la disponibilidad de agua para las raíces (punto de marchitez permanente: –1,5 MPa). Teoría: hidráulica del suelo (Hillel, 1998).
Eslabón 3: T suelo + H suelo → Actividad microbiana	Temperatura del suelo (5–25 °C rango activo); humedad del suelo (40–80% de la capacidad de campo como rango óptimo).	Biomasa microbiana del suelo (mg C/kg); respiración basal (mg CO ₂ -C/kg/día); actividad enzimática (fosfatasas, ureasa, deshidrogenasas).	La actividad microbiana sigue la ecuación de Arrhenius modificada (efecto temperatura: Q ₁₀ ≈ 2,0–2,5) con restricción hídrica adicional (curva de Linn y Doran, 1984). Los microorganismos son los agentes

Eslabón de la Cadena Causal	Variable de Entrada (Causa)	Variable de Salida (Efecto)	Mecanismo Biofísico o Económico de Transmisión y Teoría de Referencia
			de la mineralización de la materia orgánica. Teoría: ecología microbiana del suelo (Paul, 2015).
Eslabón 4: Actividad microbiana → Disponibilidad de nutrientes	Biomasa microbiana; actividad enzimática; temperatura y humedad del suelo (a través del eslabón 3).	N mineral disponible (NH_4^+ + NO_3^-); P disponible (Olsen o Bray-1); K intercambiable; bases de cambio (Ca, Mg).	La mineralización del N (amonificación + nitrificación) y del P orgánico son procesos enzimáticos catalizado por la comunidad microbiana. El K y el Ca se liberan por mineralización de la materia orgánica y por intercambio iónico. Teoría: biogeoquímica del suelo (Brady y Weil, 2017; Schlesinger y Bernhardt, 2020).
Eslabón 5: Disponibilidad de nutrientes → Producción y calidad de biomasa	N, P, K, Ca, Mg, S y micronutrientes disponibles; temperatura del suelo; radiación solar.	Productividad primaria neta aérea (PPNA, kg MS/ha/año); proteína cruda (%); fibra detergente neutro (%); energía metabolizable (MJ/kg MS).	La producción de biomasa responde a la disponibilidad de N y P según la ley del mínimo de Liebig. La calidad nutricional del pasto (proteína, digestibilidad) es función principalmente del estado nutricional de N y S y del estadio fenológico. Teoría: fisiología vegetal aplicada (Marschner, 2012; Taiz et al., 2015).
Eslabón 6: Biomasa → Producción y calidad de leche	Biomasa disponible (kg MS/ha); calidad nutricional del pasto; temperatura del aire (índice THI); gestión del pastoreo.	Producción de leche (L/vaca/día); contenido de grasa (%); contenido de proteína (%); sólidos totales (%).	El consumo voluntario de MS es la variable mediadora: la vaca consumirá 3–3,5% de su peso vivo en MS si hay suficiente pasto de buena calidad disponible. La temperatura modula el consumo y la producción a través del THI (temperatura–humedad index). Teoría: nutrición y fisiología de la producción bovina (NRC, 2001; Allen, 2000).
Eslabón 7: Producción de leche → Ingreso económico	Producción diaria de leche (L/vaca/día); precio al productor (USD/litro); número de vacas en ordeño; estructura de costos de la finca.	Ingreso bruto ganadero (USD/mes); margen neto (USD/mes); rentabilidad del sistema.	El ingreso es el producto de la producción × el precio menos los costos variables (alimentación, salud, mano de obra) y fijos (infraestructura, financiamiento). Los costos variables aumentan durante los períodos de déficit de biomasa (mayor suplementación) creando

Eslabón de la Cadena Causal	Variable de Entrada (Causa)	Variable de Salida (Efecto)	Mecanismo Biofísico o Económico de Transmisión y Teoría de Referencia
			un efecto de doble pinza sobre el margen. Teoría: economía de la producción agropecuaria (Doll y Orazem, 1984; Hardaker et al., 2015).

Nota. PPNA: Productividad Primaria Neta Aérea. MS: Materia Seca. THI: Temperature Humidity Index. NRC.

2.7.2 La Propiedad Emergente de la Cadena: La Amplificación del Impacto

Una característica clave de la cadena causal que merece ser destacada es cómo se amplifican los impactos a lo largo de esta: los efectos del clima se intensifican en cada eslabón, haciendo que el impacto económico final sea mucho más significativo que el efecto climático inicial.

Por ejemplo, un déficit de lluvias del 30% —como lo que ocurre en un evento moderado de El Niño— puede llevar a una disminución del 40 al 50% en el N mineral disponible (eslabón 4), una reducción de la biomasa entre el 20 y el 35% (eslabón 5), una caída en la producción de leche de entre un 15 y un 25% (eslabón 6), y, finalmente, una disminución en los ingresos ganaderos que puede variar del 25 al 45% (eslabón 7) debido a la menor producción y al incremento en los costos de suplementación.

Esta amplificación explica por qué los ganaderos ven los eventos climáticos como una amenaza económica devastadora, incluso cuando el evento climático en sí no es tan severo. Además, es la razón por la que las intervenciones en los primeros eslabones de la cadena —como la gestión del suelo para preservar la actividad microbiana y la conservación de la cobertura vegetal para suavizar las variaciones de temperatura en el suelo— tienen un efecto protector mucho más contundente: una leve mejora en la disponibilidad de nutrientes puede evitar una pérdida desmedida en los ingresos finales.

"La productividad de los pastizales en los Andes tropicales está limitada por varios factores vinculados. Los factores involucrados se activan y desactivan en una secuencia controlada por el clima." (Adaptado de Hofstede et al., Los Páramos del Mundo, 2003)

2.8 La Productividad Primaria Neta Aérea como Variable Central

2.8.1 Definición y Determinantes de la PPNA en Pastizales de Altura

La Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) es un concepto clave en nuestro proyecto, especialmente en lo que respecta a la producción. Se refiere a la cantidad de biomasa vegetal que se genera en un área determinada durante un periodo específico, teniendo en cuenta el costo de la respiración de las plantas.

La PPNA representa el eslabón número cinco de nuestra cadena causal, integrando todos los efectos que el clima y el suelo tienen sobre los pastizales. Además, es la variable que establece cuánto forraje está disponible para el ganado.

En los pastizales de altura del Carchi, cinco grupos de factores determinan la PPNA: primero, la disponibilidad de recursos como la luz, el agua y los nutrientes, que controlan el potencial máximo de crecimiento; segundo, la temperatura del suelo y del aire, que afecta la velocidad de los procesos metabólicos; tercero, la composición botánica del pastizal, es decir, las especies presentes y cómo responden a los factores ambientales; cuarto, el manejo del pastoreo, que incluye la frecuencia y la intensidad de la defoliación, impactando en las reservas de carbono en las raíces; y por último, los fenómenos climáticos extremos, como heladas, sequías o encharcamientos, que pueden reducir drásticamente la PPNA en momentos específicos.

2.8.2 La Relación PPNA–Precipitación en Pastizales Andinos

En los ecosistemas de pastizales de altura, donde la cantidad de lluvia puede variar considerablemente de un año a otro, se ha observado una conexión lineal entre la precipitación anual y la PPNA dentro del rango de 400 a 1,400 mm por (Buytaert et al., 2006).

Esta relación, que se conoce como la hipótesis climática de la productividad de los pastizales, indica que, por cada milímetro adicional de lluvia en este rango, se produce aproximadamente 0.5-1 kg de materia seca excedente acumulada en la biomasa aérea. Sin embargo, con una precipitación anual superior a 1.400 mm, la mineralización y la respiración de las raíces se ven negativamente afectadas por el encharcamiento y la relación es no lineal o incluso negativa.

Para el proyecto, este hallazgo tiene un efecto inmediato, permitiendo el uso de los datos históricos de precipitación de INAMHI como predictores de PPNA en el corredor. Esto, a su

vez, amplía el periodo de análisis más allá de los 24 meses de monitoreo directo que se realizó con jaulas de exclusión.

Además, la creación de modelos de regresión que relacionen la precipitación con la PPNA medida en el campo —uno de los objetivos específicos del Capítulo 7— facilitará la reconstrucción de la serie histórica de PPNA en el corredor ganadero del Carchi desde el año 2000. Esto abrirá la puerta a la posibilidad de vincular directamente la variabilidad climática del pasado con datos históricos de producción de leche y cifras económicas del sector.

2.9 Los Servicios Ecosistémicos del Suelo y el Pastizal de Altura

2.9.1 El Suelo como Capital Natural

Una forma interesante de mirar el proyecto desde un enfoque teórico es a través del concepto de capital natural. Los suelos y pastizales del corredor ganadero del Carchi no son meramente elementos de producción agropecuaria; son activos naturales que ofrecen una amplia variedad de servicios ecosistémicos. Estos servicios incluyen provisión, regulación, soporte y aspectos culturales, y su valor económico total es considerablemente más alto que el valor directo que generan a través de la producción (Costanza et al., 2014).

Dentro de estos servicios, los de provisión que más impactan al proyecto son la generación de biomasa forrajera y el ciclo de nutrientes que la respalda. Sin embargo, no podemos pasar por alto los servicios de regulación. Por ejemplo, los Andisoles del corredor funcionan como verdaderas esponjas que regulan los flujos del río Carchi y sus afluentes, mientras que la cobertura de páramo ayuda a controlar la temperatura y la humedad de la zona. Además, los Histosoles de páramo se comportan como importantes sumideros de carbono a nivel global. Todo esto tiene un valor económico que puede ser dañado o preservado por la ganadería, dependiendo de cómo se maneje el área y la intensidad de ese manejo.

2.9.2 La Variabilidad Climática como Perturbación del Capital Natural

Desde la óptica del capital natural, la variabilidad climática actúa como una perturbación externa que disminuye el flujo de servicios ecosistémicos que ofrecen el suelo y los pastizales. Esto se traduce en una reducción de la productividad de la biomasa, lo cual afecta el servicio de provisión. Además, altera la capacidad de regulación del agua, impactando así el servicio de regulación; acelera la pérdida de carbono orgánico del suelo, lo que afecta el servicio de

almacenamiento de carbono; y reduce la biodiversidad funcional de la comunidad microbiana del suelo, afectando el servicio de soporte.

El impacto económico que el proyecto busca medir se centra, desde la perspectiva del capital natural, en la depreciación de la capital natural provocada por la variabilidad climática. Esto se refiere a la pérdida de valor de los activos naturales del corredor que mantiene la producción ganadera. Este enfoque de capital natural tiene una importante implicación en políticas: las estrategias de adaptación que muestran más efectividad no son aquellas que compensan a los ganaderos por sus pérdidas en la producción, como los seguros de cosecha o los subsidios de emergencia. En cambio, son las que se enfocan en conservar e incrementar el capital natural del suelo y los pastizales, de forma que el sistema sea más resistente a futuras perturbaciones climáticas. Las propuestas contenidas en los Capítulos 13 y 14 del libro están elaboradas bajo esta lógica.

2.10 Los Marcos Teóricos de Referencia del Proyecto

Tabla 9.

Marcos Teóricos de Referencia del Proyecto: Autores Fundacionales, Aplicación en el Libro y Capítulos donde se Desarrollan

Marco Teórico / Concepto	Autores y Obras Fundacionales	Aplicación en este Proyecto	Capítulos del Libro donde se Desarrolla
Teoría de la biogeoquímica del suelo: ciclos de nutrientes y su control ambiental	Brady y Weil (2017): <i>The Nature and Properties of Soils</i> ; Schlesinger y Bernhardt (2020): <i>Biogeochemistry: An Analysis of Global Change</i> ; Paul (2015): <i>Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry</i> .	Marco fundamental para la sección 2.3 y los Capítulos 5 y 6. Provee las bases teóricas de los ciclos de N, P, K y bases en los Andisoles del corredor y la dependencia climática de los procesos microbianos.	Capítulos 2, 5 y 6 (diagnóstico edáfico y relación clima–nutrientes).
Ecología de pastizales de altura: productividad primaria neta y factores de control	McNaughton (1985): <i>Ecology of a grazing ecosystem</i> ; Lauenroth y Sala (1992): <i>Long-term forage production</i> ; Salgado-Mora et al. (2020): <i>Pastizales andinos ecuatorianos</i> .	Provee el marco para entender la respuesta de la biomasa de los pastizales del corredor a los factores climáticos y edáficos, y los métodos de estimación de PPNA. Aplicado en los Capítulos 7 y 9.	Capítulos 2 y 7 (producción de biomasa y capacidad de carga).

Marco Teórico / Concepto	Autores y Obras Fundacionales	Aplicación en este Proyecto	Capítulos del Libro donde se Desarrolla
Fisiología de la producción lechera bovina: nutrición, estrés térmico y respuesta productiva	NRC (2001): Nutrient Requirements of Dairy Cattle; Allen (2000): Effects of diet on short-term regulation of feed intake; West (2003): Effects of heat-stress on production.	Sustenta el eslabón 6 de la cadena causal (biomasa → leche) y la metodología de monitoreo de hatos centinela. El índice THI como herramienta de cuantificación del estrés calórico en las razas bovinas del corredor.	Capítulos 2 y 8 (producción de leche y confort térmico animal).
Climatología andina y cambio climático en los Andes tropicales	Vuille et al. (2018): Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes; Marengo et al. (2020): Climate change in Central and South America; Rabatel et al. (2013): Current state of glaciers in the tropical Andes.	Marco para la interpretación de las tendencias climáticas del corredor del Carchi en el contexto de los cambios documentados en los Andes tropicales y para la construcción de los escenarios de cambio climático al 2035 y 2050.	Capítulos 2, 4 y 12 (caracterización climática y escenarios económicos).
Economía de la producción agropecuaria bajo riesgo e incertidumbre climática	Hardaker et al. (2015): Coping with risk in agriculture; Barnett y Mahul (2007): Weather index insurance for agriculture; Zuberaman-Milovsky (2018): Agroclimatic risk and farmers' behavior.	Fundamenta el análisis económico de los Capítulos 10, 11 y 12. Provee los métodos de análisis del impacto económico de la variabilidad climática: análisis de series de tiempo, funciones de daño, análisis costo-beneficio de la adaptación.	Capítulos 2, 10, 11 y 12 (economía de los sistemas ganaderos y escenarios).
Servicios ecosistémicos del suelo y del pastizal de altura	Costanza et al. (1997): The value of the world's ecosystem services; Daily et al. (1997): Nature's services; Dominati et al. (2010): A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils.	Provee el marco conceptual para la valoración económica de los servicios de regulación del suelo (ciclos de nutrientes, regulación hídrica, almacenamiento de carbono) que son afectados por la variabilidad climática.	Capítulos 2 y 11 (valor económico de los servicios del suelo y del pastizal).

Nota. Elaboración propia.

La unión de estos seis marcos teóricos no se trata de un simple añadido, sino más bien de un sistema interconectado: el proyecto los requiere de manera simultánea porque el problema que aborda —el efecto de los factores climáticos en la producción ganadera y sus repercusiones económicas— se sitúa en el cruce de diversas áreas como la biogeoquímica del suelo, la ecología de pastizales, la fisiología animal, la climatología andina, la economía agropecuaria y la ecología del paisaje.

Ninguno de estos marcos por sí solo es capaz de ofrecer una visión completa de la cadena causal; es la combinación de todos ellos la que facilita el diseño metodológico del proyecto y permite una interpretación coherente de los resultados obtenidos.

2.11 Síntesis del capítulo

- Variables climáticas críticas: siete variables con rangos óptimos y umbrales documentados para los pastizales andinos (Tabla 5): temperatura del aire, precipitación total, intensidad de la lluvia, radiación solar, temperatura del suelo, heladas y humedad relativa; la temperatura del suelo como variable mediadora entre el clima y la actividad microbiana del suelo, con el pastizal en buen estado como buffer térmico fundamental.
- Ciclos biogeoquímicos: cinco nutrientes y su diferente sensibilidad climática (Tabla 6): N (muy sensible; tasa de mineralización $Q_{10} \approx 2,0-2,5$; la lixiviación de NO_3^- y la intensidad de la lluvia son directamente proporcionales), P (la paradoja del fósforo en Andisoles: alto contenido de P total, bajo contenido de P disponible; pulsos de disponibilidad mediante la inundación), K (alta movilidad, alta lixiviación; pérdida de 30–50% del K intercambiable por cada evento de 50 mm de precipitación en un suelo sin cobertura), Ca-Mg (controlados por pH; riesgo de hipomagnesemia en vacas en alta producción), S y micronutrientes (S sensible a T del suelo; Zn y Cu controlados por pH).
- Variabilidad vs. cambio climático: distinción conceptual necesaria para el diseño del proyecto; el ENSO como moduladora dominante de la variabilidad de la precipitación y temperatura interanual en el Carchi; el proyecto trabaja la variabilidad actual (2000–2024) en los Caps. 4–11 y con el cambio climático (RCP 4.5 y 8.5) en el Cap. 12.
- ENSO en el Carchi: Tabla 7 con cuatro fases; El Niño moderado: –8/15% flujo de ingresos ; El Niño fuerte: –25/45% flujo de ingresos (pérdidas USD 3.200–5.400/finca en 2015–2016); La Niña: efecto paradójico (más biomasa, menos calidad); fase neutra: el referente productivo que se toma como histórico; la señal ENSO se detecta en los datos ESPAC de producción de leche del Carchi (–8/18% en los años El Niño fuerte).

- Índice THI: herramienta de cuantificación del estrés térmico; THI < 68: sin estrés; 68–72: nivel de estrés (–5/10% producción); 72–80: estrés moderado (–10/25%); >80: estrés severo (>25%); en el corredor del Carchi: nivel de estrés potencial en zonas bajas (2.200–2.600 msnm) en verano; en zonas de páramo (>3.200 msnm) el mecanismo dominante es el de reducción de la biomasa, no el estrés térmico.
- Cadena causal integrada: Tabla 2.4 con siete eslabones: Clima → T suelo (conducción térmica) → H suelo (balance hídrico) → Actividad microbiana (Arrhenius) → Disponibilidad de nutrientes (mineralización + ciclos biogeoquímicos) → Producción y calidad de biomasa (ley del mínimo de Liebig) → Producción y calidad de leche (NRC, THI) → Ingreso económico (efecto de doble pinza: menor producción + mayor costo de suplementación); propiedad de amplificación: un déficit de precipitación del 30% puede traducirse en una reducción del ingreso del 25–45%.
- Seis marcos teóricos: biogeoquímica del suelo (Brady y Weil; Paul; Schlesinger), ecología de pastizales de altura (McNaughton; Lauenroth; Salgado-Mora), fisiología de la producción lechera (NRC; Allen; West), climatología andina y cambio climático (Vuille; Marengo; Rabatel), economía agropecuaria bajo riesgo (Hardaker; Barnett; Zuberaman-Milovsky) y servicios ecosistémicos del suelo (Costanza; Daily; Dominati); articulación sistémica necesaria porque el problema ocurre en la intersección de todas estas disciplinas.

CAPÍTULO 3

Estado del Arte:

Revisión Sistemática de la Literatura

Protocolo PRISMA adaptado, síntesis de hallazgos sobre clima y nutrientes del suelo en los Andes, producción de biomasa y leche bajo variabilidad climática, impacto económico cuantificado y las cinco brechas de la literatura que el proyecto de investigación busca llenar



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** el protocolo de revisión sistemática adoptado por el proyecto —adaptado de la metodología PRISMA— y comprender cómo la aplicación de criterios explícitos de búsqueda, inclusión y evaluación de calidad garantiza la representatividad y el rigor de la síntesis de la literatura.
- **Identificar** los resultados clave de la investigación publicada sobre el impacto de factores climáticos (temperatura, precipitación, heladas y ENSO) en los ciclos de nutrientes de los pastizales altos andinos en la literatura científica internacional.
- **Analizar** la literatura publicada sobre el impacto de la variabilidad climática en la disponibilidad de nutrientes del suelo, la producción biológica y la producción de leche del ganado de pastoreo de los Andes tropicales, con un enfoque particular en Ecuador y Colombia.

- **Evaluar** el estado actual de la literatura disponible sobre los efectos económicamente medibles de la variabilidad climática en los sistemas cárnicos de las tierras altas de América del Sur, incluyendo los estudios más pertinentes para formular las hipótesis económicas del proyecto.
- **Identificar** las cinco brechas bibliográficas más importantes que el proyecto de investigación pretende satisfacer, describiendo la naturaleza de las brechas—empíricas, teóricas mecanicistas, metodológicas, de previsión o de políticas—y el diseño del proyecto para abordar las brechas.

3.1 Introducción: Por qué una Revisión Sistemática y no una Revisión Narrativa

La revisión de literatura en un proyecto de investigación cumple dos roles principales que a menudo se confunden: el rol epistemológico, que establece lo que se conoce con certeza, lo que se conoce con dudas y lo que permanece en la incertidumbre, y el rol retórico, que justifica la importancia del proyecto al demostrar que aborda una verdadera laguna en el conocimiento existente.

Este capítulo adopta un protocolo de revisión sistemática adaptado, inspirado en la metodología PRISMA (Ítems de Reporte Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Meta-Análisis), porque el diseño del proyecto de investigación requiere estimaciones cuantitativas de los parámetros de la cadena causal (los coeficientes que relacionan clima-nutrientes, nutrientes-biomasa y biomasa-leche). Estos datos solo se pueden obtener mediante una síntesis rigurosa y representativa de la literatura.

Si esos parámetros están sesgados debido a una revisión selectiva, los modelos del proyecto estarán mal calibrados y sus predicciones serán poco confiables.

"Una revisión sistemática no es simplemente una revisión más completa que una narrativa: es una revisión que puede ser replicada, que explicita sus criterios de inclusión y exclusión, y que puede ser actualizada cuando nueva evidencia está disponible." (Higgins y Green, *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*, 2011)

La adaptación del protocolo PRISMA al contexto específico del proyecto reconoce la falta de una base de datos única y completa sobre ganadería de altura andina, que sería equivalente a las bases de datos de ensayos clínicos para las que fue originalmente diseñado el PRISMA.

Esta adaptación incluye fuentes de literatura gris, como informes técnicos del INIAP, boletines del INAMHI y datos no publicados de universidades de la región, que son altamente relevantes para el contexto del Carchi y que una aplicación estricta del PRISMA original probablemente excluiría.

3.2 Protocolo de la Revisión Sistemática

Tabla 10.
Protocolo PRISMA Adaptado para la Revisión Sistemática de la Literatura sobre Clima, Suelo, Biomasa y Economía Ganadera en los Andes Tropicales

Fase del Protocolo	Criterios y Procedimientos	Resultados de la Aplicación del Protocolo
Fase 1: Definición del alcance	Se formularon tres preguntas PICO sobre la relación entre variabilidad climática, nutrientes del suelo, productividad de pastizales e impacto económico en sistemas ganaderos de altura de los Andes tropicales.	Las tres preguntas delimitan el alcance de la revisión y evitan la dispersión hacia literaturas tangenciales (impacto climático en la agricultura de secano, ciclos de nutrientes en bosques tropicales, economía ganadera en zonas bajas).
Fase 2: Búsqueda sistemática	Bases de datos: Web of Science, Scopus, SciELO, REDALYC, Google Scholar y repositorios institucionales (INIAP, MAGAP, UPEC, Universidad de Nariño, INAMHI). Período: 2000–2024. Idiomas: español, inglés y portugués. Operadores booleanos: ('climate* AND soil nutrient* AND grassland AND Andes') OR ('variabilidad climática AND suelos ganaderos AND Sierra ecuatoriana') OR ('ENSO AND livestock AND Andes') OR ('pasture productivity AND altitude AND Ecuador OR Colombia OR Peru'). Búsqueda complementaria de literatura gris: informes técnicos del INIAP (2000–2024), boletines del INAMHI, bases de datos del INEC–ESPAC y datos no publicados de la Estación Experimental Santa Catalina.	Búsqueda inicial: 4.218 títulos y resúmenes identificados. Tras la eliminación de duplicados: 3.847 registros únicos. Aplicación de criterios de elegibilidad (resumen): 612 artículos seleccionados para lectura completa. Inclusión final: 187 estudios que cumplen todos los criterios de inclusión, de los cuales 94 son directamente citados en este capítulo.

Fase del Protocolo	Criterios y Procedimientos	Resultados de la Aplicación del Protocolo
Fase 3: Criterios de inclusión	(a) Estudios realizados en sistemas ganaderos o pastizales de altura (> 2.000 msnm) en los Andes tropicales de Ecuador, Colombia, Perú o Bolivia. (b) Que cuantifiquen al menos una variable climática y al menos una variable edáfica, productiva (biomasa o leche) o económica. (c) Publicados entre 2000 y 2024. (d) Con diseño metodológico explícito y datos primarios o series de datos secundarios validados. (e) En idioma español, inglés o portugués.	De los 612 artículos en lectura completa: 225 excluidos por contexto geográfico no relevante (zonas bajas, latitudes templadas), 87 excluidos por ausencia de datos cuantitativos, 113 excluidos por período anterior al 2000.
Fase 4: Extracción de datos	Formulario estandarizado para cada estudio incluido: país y zona de estudio, altitud, sistema ganadero, variables climáticas medidas, variables edáficas medidas, variables productivas medidas, variables económicas medidas, período de estudio, tamaño muestral, método estadístico principal, resultados cuantitativos principales, limitaciones reportadas.	Extracción completada para 187 estudios. Síntesis narrativa para las dimensiones climática, edáfica, productiva y económica. Análisis de brecha para identificar los vacíos de la literatura que el proyecto de investigación busca llenar.
Fase 5: Evaluación de calidad	Escala de valoración en cinco criterios (1–3 puntos cada uno): claridad del diseño metodológico, representatividad de la muestra, validez de los instrumentos de medición, transparencia en el análisis estadístico, reproducibilidad de los resultados. Puntuación máxima: 15 puntos. Estudios con puntuación < 7: excluidos de las conclusiones cuantitativas pero incluidos en la síntesis narrativa.	Distribución de puntajes: 43 estudios de calidad alta (12–15 puntos); 89 estudios de calidad media (8–11 puntos); 55 estudios de calidad baja pero informativamente relevantes (< 8 puntos). Las estimaciones cuantitativas del capítulo se basan exclusivamente en los estudios de calidad alta y media.

Nota. Elaboración propia.

3.2.1 Resultados del Proceso de Selección

El protocolo implementado ha dado lugar a un conjunto final de 187 estudios que cumplen con todos los criterios de inclusión. De estos, 94 se citan directamente en este capítulo. La distribución geográfica de los estudios incluidos ofrece una visión del estado de la investigación en la región: Ecuador tiene 31 estudios, lo que representa el 16.6%; Colombia cuenta con 58, equivalente al 31.0%; Perú presenta 29 estudios, que son el 15.5%; Bolivia suma 18, o sea el 9.6%; y hay 51 estudios que abarcan varios países de los Andes tropicales, que constituyen el 27.3% del total.

El hecho de que Ecuador, siendo el país del proyecto, esté sub-representado, resalta una clara brecha en la investigación dentro del contexto ecuatoriano, una situación a la que el proyecto aspira a aportar soluciones. En cuanto a la distribución por dimensiones de análisis, se observa que el 87.2% del corpus incluye estudios con datos climáticos, el 61.5% con datos edáficos, el 54.0% con datos sobre producción de biomasa, el 38.5% con datos de producción láctea y el 29.4% que abordan datos económicos.

La tendencia a la baja en el porcentaje de estudios que abarcan las dimensiones más complejas —como la económica y la de producción de leche— revela, por sí sola, las lagunas en la literatura existente. La investigación ha sido notablemente más rica en las dimensiones biofísicas en comparación con las productivo-económicas. Además, es casi inexistente encontrar estudios que integren las cuatro dimensiones.

3.3 Clima y Nutrientes del Suelo en los Andes Tropicales: Síntesis de la Evidencia

3.3.1 El Consenso sobre la Sensibilidad Climática de los Andisoles

La revisión de la literatura muestra un claro acuerdo sobre tres puntos clave relacionados con los Andisoles de los páramos y pastizales de altura en los Andes tropicales

En ese punto se aprobó que la mineralización del nitrógeno se considera uno de los procesos biogeoquímicos más sensibles a las variaciones climáticas en los suelos de los sistemas ganaderos de altura de los Andes tropicales. Las investigaciones recientes han demostrado que el aumento de la temperatura y los cambios en los patrones de precipitación pueden modificar las tasas de mineralización, y por ende la disponibilidad de nitrógeno para los pastizales y, por tanto, la productividad. Con ello se puso de aliviar la necesidad de tener en cuenta la

variabilidad climática como un factor importante en la dinámica de los nutrientes del suelo y en la sostenibilidad de los sistemas ganaderos de altura (Zimmer et al.)

En segundo lugar, la disponibilidad de fósforo se ve limitadamente estructurada por la alta capacidad de adsorción de los minerales amorfos. Esta restricción se intensifica en condiciones de temperaturas bajas y humedad extrema.

Por último, la continua cobertura vegetal del pastizal actúa como el principal mecanismo que amortigua las fluctuaciones climáticas sobre los procesos del suelo. Sin embargo, su degradación, a menudo provocada por el sobrepastoreo, agrava el efecto de la variabilidad climática en la disponibilidad de nutrientes.

Tabla 11.

Síntesis de los Estudios más Relevantes sobre el Efecto de los Factores Climáticos sobre la Dinámica de Nutrientes del Suelo en Pastizales Andinos de Altura

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Variables	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia para el Proyecto del Carchi
Podwojewski et al. (2002)	Andisoles del páramo de Tungurahua (Ecuador); 3.400–3.800 msnm; efecto del sobrepastoreo sobre propiedades del suelo y ciclo del N.	El sobrepastoreo (> 2 UA/ha) redujo el contenido de materia orgánica en un 35–48% respecto a suelos no pastoreados. La mineralización del N disminuyó 62% bajo sobrepastoreo intenso, con reducción del N mineral disponible de 45–65 mg/kg a 12–22 mg/kg.	Establece el rango de referencia del N mineral para los Andisoles del Ecuador y confirma la alta sensibilidad del ciclo del N al manejo ganadero. La interacción manejo × clima en el ciclo del N es uno de los efectos a cuantificar en el Cap. 6.
Farley et al. (2004)	Andisoles de páramos del Ecuador (3.000–3.800 msnm); efecto de la conversión de pastizales a plantaciones de pino sobre el carbono orgánico del suelo y la retención de agua.	La conversión de páramo a pino redujo el carbono orgánico del suelo en un 29% en los primeros 40 años. La capacidad de retención de agua disminuyó 35%. Los Andisoles bajo pino mostraron mayor variación en la humedad del suelo ante eventos de lluvia intensa.	Cuantifica el valor de la cobertura vegetal de pastizal como regulador del carbono y la humedad del suelo; relevante para los Caps. 5 y 13 (estrategias de manejo que preserven la cobertura).
Buytaert et al. (2006)	Meta-análisis de 14 estudios en páramos andinos del Ecuador,	El pastoreo intensivo redujo la infiltración del suelo en 40–65% y	Cuantifica el impacto del manejo ganadero sobre los servicios hidrológicos del

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Variables	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia para el Proyecto del Carchi
	Colombia y Venezuela; 2.800–4.500 msnm; impacto humano sobre la hidrología del páramo.	aumentó el coeficiente de escorrentía en 25–45%. La retención de agua disminuyó en promedio 31% en suelos bajo pastoreo continuo respecto a páramos sin intervención.	suelo; relevante para el análisis de servicios ecosistémicos del Cap. 11 y para las estrategias de adaptación del Cap. 13.
Salgado-Mora et al. (2020)	Pastizales en gradientes altitudinales de la Sierra Norte del Ecuador (2.000–3.800 msnm); producción de biomasa y calidad nutricional en función de la altitud.	La PPNA disminuyó de 8.200 kg MS/ha/año a 2.200 msnm a 3.100 kg MS/ha/año a 3.600 msnm. El contenido de proteína cruda fue inversamente proporcional a la temperatura ($r=-0,68$) e inversamente proporcional a la altitud ($r=-0,71$, $p<0,001$).	Provee los datos de referencia de PPNA para el corredor altitudinal del Carchi. La relación proteína–altitud documentada es un predictor de la calidad nutricional de los sistemas del Tipo I y II del proyecto.
Llambí et al. (2014)	Páramos de Venezuela, Colombia y Ecuador; dinámica de la materia orgánica del suelo bajo diferentes regímenes climáticos y de manejo; 3.000–4.200 msnm.	La tasa de descomposición de la materia orgánica fue 3,2–4,8 veces más lenta en suelos de páramo que en suelos de pastizales tropicales de baja altitud, explicada principalmente por la temperatura del suelo ($r^2=0,82$ para la relación T suelo–tasa de descomposición).	El coeficiente de regresión T suelo–tasa de descomposición es el parámetro más crítico para calibrar los modelos de disponibilidad de N del proyecto; el $r^2=0,82$ documenta la elevada predictibilidad del proceso con la temperatura.
Cárdenas et al. (2017)	Sistemas ganaderos del altiplano cundiboyacense de Colombia (2.500–3.200 msnm); efecto de la variabilidad de la precipitación sobre el N del suelo y la producción de pasto kikuyo.	En años con déficit de precipitación del 20–30% (El Niño): el N mineral disponible se redujo 38–52%; la biomasa de kikuyo disminuyó 28–35%; el contenido de proteína cruda cayó de 17,8% a 11,3%. El Q10 de la mineralización del N fue 2,2 en estos suelos.	El sistema colombiano del altiplano cundiboyacense es el más directamente comparable al corredor del Carchi; los valores Q10, los porcentajes de reducción de N y biomasa y la caída de proteína cruda son los parámetros de referencia para las hipótesis del proyecto.
Recalde-Yáñez et al. (2019)	Primer estudio de producción de biomasa en	La fertilización con N (100 kg N/ha/año)	Único estudio con datos primarios del corredor

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Variables	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia para el Proyecto del Carchi
	el corredor Carchi–Imbabura (Ecuador) bajo diferentes regímenes de fertilización; 2.800–3.400 msnm.	aumentó la PPNA en 45–68% respecto al testigo sin fertilizar. La respuesta a la fertilización fue significativamente menor en los años El Niño (2015–2016) que en los años de fase neutra (reducción del efecto del 35%), sugiriendo una interacción clima × fertilización no previamente documentada para el corredor.	Carchi–Imbabura. La interacción clima × fertilización documentada es de alta relevancia para las recomendaciones de manejo del suelo del Cap. 13 y para el diseño del experimento del Cap. 6.
Mora-Delgado et al. (2021)	Sistemas silvopastoriles de altura en Nariño, Colombia (2.400–3.100 msnm); efecto sobre el ciclo del C y N del suelo y la producción de biomasa.	Los sistemas silvopastoriles aumentaron el contenido de carbono orgánico del suelo en 22–38% respecto a pastizales convencionales a los 8 años. El N mineral disponible fue 28% mayor en sistemas silvopastoriles. La biomasa de gramíneas fue 15% mayor pero la calidad proteica fue similar.	Provee datos sobre el potencial de los sistemas silvopastoriles como estrategia de adaptación en el corredor; relevante para el Cap. 14 (sistemas ganaderos resilientes) y para la evaluación de costo-beneficio del Cap. 12.

Nota. Elaboración propia a partir de los estudios citados.

3.3.2 Vacíos en la Evidencia sobre Clima y Suelo

Tres vacíos importantes emergen de la síntesis de la literatura sobre clima y suelo en los pastizales andinos de altura. Primero, la mayoría de los estudios miden la relación clima–suelo a escala de parcela o de microcuenca, pero no a la escala del sistema ganadero completo — incluyendo la variación entre potreros con diferente estado de manejo, diferente composición botánica y diferente historial de fertilización. Segundo, la mayoría de los estudios son transversales (un solo año o una sola estación) y no capturan la dinámica interanual de la relación clima–suelo que la hipótesis del proyecto plantea. Tercero, ningún estudio publicado combina el monitoreo climático de alta frecuencia (diario o semanal) con el muestreo de suelos

estacional en el corredor específico del Carchi, lo que impide calibrar los modelos de la cadena causal con parámetros locales.

3.4 Producción de Biomasa, Producción de Leche y Variabilidad Climática: La Evidencia Cuantitativa

3.4.1 La Relación Altitud–Biomasa en los Andes Ecuatorianos

Los trabajos de Salgado et al. (2020) y Recalde et al. (2019) son especialmente relevantes para el corredor del Carchi. En su investigación, Salgado et al señalan una disminución notable en la producción potencial de nutrientes alimenticios (PPNA), pasando de 8.200 kg de materia seca por hectárea al año a 2.200 msnm, hasta llegar a 3.100 kg de materia seca por hectárea al año a 3.600 msnm. Esto implica una reducción aproximada de 625 kg de materia seca por hectárea al año por cada 100 metros de aumento en la altitud, con un $r^2=0,89$ que respalda la relación entre altitud y PPNA, al controlar factores como el manejo del pastoreo.

De la misma forma, Recalde et al., (2019) analizo como las condiciones ambientales determinan la productividad y la dinámica de los nutrientes en ecosistemas altoandinos. Estos antecedentes son las bases que respaldan el presente estudio de diagnóstico, pues permiten, por un lado, considerar la altitud de los ecosistemas, y por otro, las condiciones climáticas como factores asociados a la productividad de los pastizales del corredor ganadero de altura del Carchi, sin embargo, teniendo en cuenta de que el peso de la relación estimada debe ser específico para la localidad de estudio, en virtud de las diferencias locales que puedan existir en clima, suelo y manejo ganadero.

Este gradiente de altitud se convierte en la primera referencia útil para estimar la PPNA en los cuatro tipos de sistemas ganaderos contemplados en el proyecto. Por ejemplo, para el Tipo I, que se encuentra a una altitud media de 3.500 msnm, la PPNA estimada es de alrededor de 2.300 kg de materia seca por hectárea al año; mientras que para el Tipo IV, a una altitud media de 2.400 msnm, la PPNA estimada es de aproximadamente 6.500 kg de materia seca por hectárea al año.

Además, la relación entre precipitación y biomasa observada en Ecuador y Colombia respalda la hipótesis climática sobre la productividad de los pastizales formulada por Lauenroth y Sala en 1992. Según esta hipótesis, dentro del rango de precipitación anual de 600 a 1.400 mm, cada incremento de 100 mm adicionales de lluvia se asocia con un aumento de entre 350 y 520 kg

de materia seca por hectárea al año en los pastizales de estas regiones. Esta relación es más sensible en áreas que están entre los 3.000 y 3.600 msnm, donde la precipitación es el principal factor limitante.

Tabla 12.

Síntesis de los Estudios más Relevantes sobre Producción de Leche, Estrés Térmico y Variabilidad Climática en Sistemas Ganaderos de los Andes Tropicales

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Sistema Ganadero	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia y Limitaciones para el Proyecto del Carchi
West (2003)	Revisión de 45 estudios sobre estrés calórico y producción bovina en climas cálidos y tropicales; razas Holstein y cruces; 0–1.800 msnm.	Por cada unidad de aumento del THI por encima de 68: reducción promedio de 0,2–0,4 kg leche/vaca/día. Reducción de la ingesta de MS en 0,55 kg/día por unidad de THI > 68. Retraso de la concepción en 12 días por unidad de THI > 75.	Marco cuantitativo de referencia para los efectos del THI sobre la producción. Limitación: la mayoría de los estudios son en zonas bajas tropicales; la extrapolación a altura requiere el ajuste por la menor presión parcial de O ₂ y la mayor amplitud térmica diaria del Carchi.
Navarrete-Molina et al. (2016)	Sistemas lecheros de la Sierra norte del Ecuador (Imbabura y Carchi); 2.600–3.200 msnm; variación estacional de la producción de leche y su asociación con variables climáticas.	Coeficiente de variación estacional de la producción de leche: 18–24% en sistemas del Tipo II, 12–16% en sistemas del Tipo III. Correlación precipitación–producción de leche (lag 45 días): $r=0,61$ ($p<0,01$). El 45% de la varianza de la producción de leche fue explicada por variables climáticas.	Primer estudio que cuantifica la varianza de la producción de leche explicada por el clima en la Sierra norte del Ecuador; el lag de 45 días (tiempo de respuesta del pasto a la lluvia y del animal a la calidad del pasto) es el parámetro de diseño del monitoreo de hatos centinela del proyecto.
Patiño-Builes et al. (2018)	Sistemas lecheros del altiplano nariñense (Colombia); 2.800–3.200 msnm; impacto del fenómeno El Niño 2015–2016 sobre la producción de leche y los ingresos ganaderos.	El Niño 2015–2016 redujo la producción de leche en promedio 19,3% en el altiplano de Nariño. Los costos de suplementación aumentaron 42%. El ingreso neto disminuyó 34,8% en las fincas sin acceso a crédito y 21,2% en las fincas con acceso a crédito formal.	El altiplano de Nariño es el territorio colombiano del corredor binacional con el Carchi; los datos de Nariño son el referente colombiano más directo para las hipótesis económicas del proyecto. La diferencia de impacto según acceso a crédito (34,8% vs. 21,2%) sugiere que la resiliencia financiera es también un factor de resiliencia climática.

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Sistema Ganadero	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia y Limitaciones para el Proyecto del Carchi
Tapasco et al. (2015)	Análisis de 612 fincas ganaderas de la zona andina de Colombia (1.800–3.400 msnm); modelación econométrica del efecto de la variabilidad climática sobre el ingreso ganadero; período 2002–2012.	Un aumento de 1 °C en la temperatura media anual se asocia con una reducción del ingreso ganadero neto de 7,3% (modelo de efectos fijos). Una reducción de 100 mm en la precipitación anual se asocia con una reducción del ingreso del 4,2%. El modelo explica el 52% de la varianza del ingreso ganadero.	El enfoque econométrico de Tapasco et al. (2015) es el referente metodológico para el análisis económico del Cap. 10. Los coeficientes temperatura–ingreso (–7,3%/°C) y precipitación–ingreso (–4,2%/100mm) son los parámetros de calibración para los modelos del corredor del Carchi.
Aydinalp y Cresser (2008)	Revisión de la literatura sobre impacto del cambio climático en la composición química de la leche bovina; 23 estudios; múltiples regiones.	El estrés calórico (THI > 68) reduce el contenido de grasa de la leche en 0,3–0,8 puntos porcentuales y el de proteína en 0,2–0,4 puntos porcentuales. La reducción de proteína láctea es el efecto de mayor impacto económico dado el sistema de pago por calidad del Ecuador y Colombia.	El sistema de pago por calidad de Ecuador (bonificación por proteína y grasa) amplifica el impacto económico del estrés térmico más allá de la reducción del volumen. Este efecto sobre la calidad composicional de la leche se incorpora al análisis económico del Cap. 11.
Murgueitio et al. (2016)	Sistemas silvopastoriles intensivos en Colombia (trópico y subtrópico); 500–2.500 msnm; efecto sobre el bienestar animal, la producción de leche y la resiliencia climática.	Los sistemas silvopastoriles redujeron el THI efectivo en 3–5 puntos al proveer sombra y microclima; la producción de leche fue 12–18% mayor que en sistemas convencionales en períodos de estrés calórico; la variación estacional de la producción fue 40% menor.	Relevante para el Cap. 14 (estrategias de adaptación). Limitación: la mayoría de los estudios son a altitudes < 2.500 msnm, con condiciones de estrés calórico más severas que las del Carchi; la extrapolación a sistemas de altura del corredor requiere cautela.
Echeverri-Palacio et al. (2020)	Modelación del impacto del cambio climático sobre la producción lechera de la Sierra	Bajo RCP 4.5: reducción proyectada de la producción de leche de 8–14% al 2050	Único estudio prospectivo con datos de la Sierra norte del Ecuador; sus escenarios son el punto de partida para

Estudio Autores (Año)	Contexto y Sistema Ganadero	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia y Limitaciones para el Proyecto del Carchi
	norte del Ecuador bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5; 2.400–3.400 msnm.	por efecto combinado de mayor THI y menor disponibilidad de biomasa. Bajo RCP 8.5: reducción de 18–28% al 2050. Los sistemas del Tipo I y II tienen pérdidas proyectadas 1,8 veces mayores que los del Tipo III y IV.	los escenarios económicos del Cap. 12. Limitación: el modelo no incluye la dinámica de nutrientes del suelo como variable mediadora, lo que es precisamente la brecha que este proyecto busca llenar.

Nota. THI: Temperature Humidity Index. PPNA: Productividad Primaria Neta Aérea. MS: Materia Seca. RCP: Representative Concentration Pathway. El lag de 45 días documentado por Navarrete et al., (2016)

3.4.2 La Señal ENSO en la Producción de Leche: Evidencia Cuantitativa

Los estudios realizados por Patiño et al. (2018) y Navarrete et al. (2016) ofrecen la evidencia cuantitativa más clara sobre cómo la señal ENSO afecta la producción de leche en el corredor binacional Carchi–Nariño. Por ejemplo, Patiño et al. (2018) documentaron una disminución del 19,3% durante El Niño de 2015–2016 en el altiplano de Nariño. Esta cifra se alinea con la reducción del 18,4% que se encontró en los datos de ESPAC para el Carchi contemplando el mismo período de estudio, lo cual resulta sorprendente, dado que la investigación colombiana se realizó en un diseño prospectivo con datos de finca, mientras que el cálculo ecuatoriano se sustenta en datos provinciales.

Tal concordancia pone de manifiesto que la señal ENSO es lo suficientemente robusta y sistemática como para ser detectada mediante métodos diferentes en ambos lados del corredor, legitimando, por ende, la razón de ser del uso del índice ONI como clave variable en los modelos econométricos del proyecto.

Por consideraciones adicionales, el hallazgo también es de la investigación de Patiño et al. (2018) sobre cómo el acceso al crédito formal condiciona el impacto económico es de especial interés para las políticas del proyecto, los hallazgos indicaron que las fincas con acceso al crédito experimentaron una reducción del 34,8%, mientras otras se encontraron con una disminución del 21,2%, lo cual indica que la resiliencia financiera, es decir, la capacidad de

acceder a recursos en momentos de estrés climático, es también el reflejo de una forma de resiliencia ante el clima.

Las fincas con crédito formal pueden incrementar la suplementación durante períodos de escasez de forraje sin afectar su capital de trabajo. En contraste, aquellas sin acceso a crédito se ven obligadas a disminuir su ganado o vender activos, lo que puede tener repercusiones a largo plazo en su productividad.

3.5 El Impacto Económico de la Variabilidad Climática: Estado del Conocimiento

3.5.1 De la Correlación a la Causalidad en el Análisis Económico

En la última década, los estudios económicos sobre cómo la variabilidad climática afecta la ganadería en América del Sur han hecho grandes progresos, especialmente en lo que respecta a establecer relaciones causales más allá de simples correlaciones.

El análisis realizado por Tapasco et al., (2015) destaca por su rigor econométrico. Utilizando modelos de efectos fijos y un conjunto de datos de 612 fincas a lo largo de 10 años, lograron controlar variables no observables de cada finca, como la calidad del suelo, la experiencia del propietario y el historial de manejo. Esto les permitió aislar el impacto real de las condiciones climáticas en los ingresos del ganado.

Las estimaciones que obtuvieron son bastante significativas: identificaron que un aumento de un grado centígrado en la temperatura podría conllevar a una reducción del 7.3% en los ingresos, mientras que cada 100 mm menos de lluvia implicarían una disminución del 4.2%. Estos resultados son considerados las estimaciones más creíbles en cuanto a causalidad dentro de la literatura sobre el contexto andino colombiano

Tabla 13.

Síntesis de los Estudios más Relevantes sobre el Impacto Económico de la Variabilidad Climática en Sistemas Ganaderos de Alta Montaña de América del Sur

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Enfoque Económico	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia y Limitaciones para el Proyecto del Carchi
Reardon y Vosti (1995)	Marco conceptual sobre pobreza rural y degradación ambiental en América Latina; el círculo vicioso pobreza–	Los hogares rurales bajo la línea de pobreza (< USD 2/día) destinan el 68% de su capital a inversiones de corto plazo incompatibles	Marco teórico para entender por qué los ganaderos del Tipo I no invierten en manejo del suelo incluso cuando la evidencia técnica lo

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Enfoque Económico	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia y Limitaciones para el Proyecto del Carchi
	degradación–productividad.	con la conservación del suelo. La tasa de descuento implícita de los pobres rurales es 2–4 veces mayor que la social, haciendo racional la minería del suelo a corto plazo.	justifica. La tasa de descuento implícita alta es la base del análisis de la trampa de pobreza-degradación del Cap. 11.
Pardo-Rozo et al. (2018)	Análisis de costos de producción de leche en sistemas ganaderos de la Sierra ecuatoriana; 2.400–3.200 msnm; 85 fincas; año 2017.	Costo de producción promedio: USD 0,31–0,38/litro en sistemas del Tipo II; USD 0,24–0,29/litro en sistemas del Tipo III. El costo de alimentación representa el 48–62% del costo total de producción. En años con déficit forrajero por variabilidad climática, el costo de alimentación aumenta 22–34% por el incremento de la suplementación.	El rango de costos es el referente más actual y contextualmente apropiado para el análisis de rentabilidad del Cap. 10. La participación del 48–62% de la alimentación en los costos totales es el multiplicador del impacto económico de la variabilidad climática sobre los márgenes.
Osorio-Barreto et al. (2020)	Análisis del impacto económico de las heladas sobre la ganadería lechera en los páramos de Nariño y Putumayo (Colombia); 3.000–3.600 msnm; período 2012–2019.	Las heladas causaron pérdidas económicas de USD 280–640 por finca por evento en sistemas del Tipo I y II. La frecuencia de heladas dañinas aumentó 38% en el período 2012–2019 respecto a 2000–2011. El 71% de los ganaderos afectados no contaba con seguro agropecuario.	Único estudio que cuantifica el impacto económico de las heladas en sistemas ganaderos de alta montaña colombiana. La ausencia de seguro agropecuario (71%) es un indicador de la vulnerabilidad financiera estructural del sistema; el porcentaje es comparable al estimado para el Carchi en el diagnóstico preliminar.
Rivas-García et al. (2019)	Meta-análisis de 34 estudios sobre el valor de los servicios ecosistémicos del suelo en pastizales de América Latina; 2000–2018.	El valor económico total de los servicios de regulación del suelo de los pastizales andinos es de USD 180–420/ha/año (en términos de valor de mercado de los servicios equivalentes).	Provee el marco para la valoración de los servicios ecosistémicos del suelo del corredor del Carchi en el Cap. 11. El rango USD 180–420/ha/año es la estimación de referencia para valorar el costo de la degradación de la capital

Estudio / Autores (Año)	Contexto y Enfoque Económico	Hallazgo Principal Cuantificado	Relevancia y Limitaciones para el Proyecto del Carchi
		El servicio de almacenamiento de carbono representa el 35–48% del valor total; la regulación hídrica el 28–35%; la producción de biomasa el 17–25%.	natural inducida por la variabilidad climática.
Vásquez-Morales et al. (2022)	Análisis de adaptación climática en sistemas ganaderos lecheros de la Sierra Norte del Ecuador; encuesta a 234 productores; 2.400–3.400 msnm.	Solo el 23% de los ganaderos encuestados había implementado alguna práctica de adaptación formal (mejoramiento de pastizales, sistema de riego, almacenamiento de forraje). El principal obstáculo declarado fue la falta de información técnica (41%), seguido del costo de las prácticas (35%) y la falta de acceso a crédito (24%).	El estudio de Vásquez-Morales et al. (2022) es el de mayor relevancia contextual para el corredor del Carchi. Los obstáculos a la adaptación documentados (falta de información, costo, crédito) son la base del diagnóstico de vulnerabilidad del Cap. 9 y de las propuestas de política del Cap. 14.
Thornton et al. (2009)	Análisis global del impacto del cambio climático sobre la ganadería en países en desarrollo; proyecciones al 2050 bajo escenarios SRES A2 y B1.	En los Andes tropicales, la producción ganadera podría disminuir 8–20% al 2050 por efecto del calentamiento y la mayor frecuencia de eventos extremos. Los sistemas mixtos de pequeña escala son 2,3 veces más vulnerables que los sistemas empresariales por su menor capacidad de adaptación.	Estudio de referencia para contextualizar los resultados del proyecto en el marco del cambio climático global. La diferencia de vulnerabilidad entre pequeña y gran escala (factor 2,3) es consistente con los patrones preliminares del corredor del Carchi y fundamenta la estratificación del análisis por tipo de sistema.

Nota. Elaboración propia a partir de los estudios citados.

3.5.2 El Costo de la No Adaptación: Una Brecha Crítica

Uno de los principales vacíos en la literatura económica revisada es la falta de estudios que evalúen el costo de no adaptarse —es decir, cuánto podría perder el sector ganadero a largo plazo si no se implementan estrategias de adaptación climática— en contraste con el costo de dichas estrategias de adaptación.

Los estudios de Thornton et al., (2009) estiman que, sin adaptación, las se estima que las pérdidas productivas podrían llegar a un rango que oscilaría entre el 8% y el 20% en el año 2050, sin ninguna monetización de estas pérdidas y sin que estas se contrasten con los costes relacionados con la implementación de la adaptación.

Mientras que Vásquez et al., (2022) consideran que solamente un 23% de los ganaderos aplican alguna recomendación de adaptación, siendo la principal barrera la falta sobre información técnica y apropiada (41%); lo que podría expresar que a pesar que existe interés por adaptarse, la falta de información sobre los beneficios potenciales paraliza su acción.

Esta brecha es precisamente lo que el Capítulo 12 del libro se propone abordar: crear escenarios económicos comparativos con y sin adaptación bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5. El objetivo es generar estimaciones sobre el costo de no adaptarse que los tomadores de decisiones del MAG, el INIAP y los GAD provinciales necesiten para respaldar la inversión en programas de adaptación climática para el sector ganadero del Carchi.

3.6 Estudios Específicos del Corredor Carchi–Nariño: Lo que se Sabe y lo que Falta

3.6.1 La Investigación Disponible para el Corredor

El corredor Carchi–Nariño, que abarca la zona binacional del corredor ganadero de altura entre Carchi y el altiplano de Nariño en Colombia, presenta un número limitado de investigaciones científicas que sean lo suficientemente sólidas como para ser consideradas en esta revisión. En el lado ecuatoriano, los trabajos de Recalde et al. (2019) y Navarrete-Molina et al. (2016) son los únicos estudios que cuentan con datos primarios del corredor y cumplen con los criterios establecidos.

Por otro lado, en la parte colombiana, los estudios de Patiño-Builes et al. (2018) y Mora-Delgado et al. (2021) son los más relevantes para el corredor nariñense. Esta falta de investigaciones—solo cuatro estudios con datos primarios en 24 años de literatura revisada—es, sin duda, una de las razones más contundentes para llevar a cabo este proyecto de investigación.

Además, el análisis de la investigación que existe sobre el corredor pone de manifiesto un patrón preocupante: los estudios actuales están desconectados entre sí. No hay un solo caso en el que un grupo de investigación ecuatoriano haya colaborado con uno colombiano para ofrecer

un análisis conjunto del corredor binacional. Los trabajos provenientes de Ecuador y Colombia raramente se citan mutuamente, lo que genera una literatura fragmentada que refleja las mismas barreras institucionales que obstaculizan la integración efectiva del corredor estudiado.

3.6.2 La Tesis Doctoral de Recalde-Yáñez (2019) como Punto de Partida

El estudio realizado por Recalde et al. (2019), que surge de una tesis doctoral en la Universidad Central del Ecuador, es el más relevante para nuestro proyecto. Esto se debe a que es el único que aporta datos primarios sobre fertilización y producción de biomasa en el corredor Carchi–Imbabura, y su análisis estadístico es lo suficientemente sólido como para que lo consideremos una referencia.

Entre los hallazgos más significativos de este estudio se encuentran dos puntos clave: primero, se documenta la interacción entre el clima y la fertilización. En particular, el efecto de la fertilización con nitrógeno en la PPNA es claramente menor en los años de El Niño que en aquellos años con fase neutra, de manera que la variabilidad climática afecta no solo la producción de biomasa, sino que también afecta la respuesta del pastizal frente a las prácticas de manejo.

En segundo lugar, se confirma que el valor de Q10 para la mineralización del nitrógeno en los Andisoles del corredor muestra valores de entre 2,1 y 2,3, valor que está acorde con el rango de 2,0 a 2,5 que se ha reportado en otros estudios realizados en otros países andinos.

Sin embargo, hay una limitación importante en el trabajo de Recalde-Yáñez et al. (2019) que abre la puerta para nuestra investigación: su período de estudio, que abarca de 2014 a 2017, no incluye años de La Niña ni un año completo de ENSO neutro. Esto dificulta la cuantificación del impacto diferencial del ENSO sobre la mineralización del nitrógeno y la PPNA.

Nuestro proyecto de investigación, que se desarrollará entre 2023 y 2025, tiene la ventaja de que, de acuerdo con las proyecciones del ENSO, abarcará al menos un evento El Niño moderado y posiblemente una fase de La Niña. Esto nos permitirá, por primera vez, capturar la variabilidad interanual completa del ciclo ENSO en el corredor del Carchi.

3.7 Comparación con Otros Corredores Ganaderos Andinos

3.7.1 El Altiplano Nariñense como Espejo Binacional

El altiplano nariñense de Colombia, que forma parte del corredor binacional, representa el sistema ganadero andino más parecido al Carchi. Esto se debe a su altitud que varía entre 2.800 y 3.400 msnm, su clima, con temperaturas medias de entre 11 y 14 °C, y precipitaciones anuales que oscilan entre 700 y 1.200 mm. Además, el tipo de suelo predominante en esta región son los Andisoles volcánicos, y el sistema productivo más común es el de leche, utilizando principalmente ganado Holstein y sus cruza.

Investigaciones como las de Patiño et al. (2018), Cárdenas et al. (2017) y Mora et al. (2021) han aportado datos cuantitativos sobre el altiplano nariñense, convirtiéndolos en referencias clave para el proyecto. Uno de los análisis que se llevará a cabo en el Capítulo 9 de este proyecto será la comparación sistemática de los resultados del corredor del Carchi con los obtenidos en el altiplano nariñense. Esta comparación tiene como propósito identificar qué variaciones en los resultados se deben a diferencias biofísicas entre los territorios y cuáles son el resultado de distintas prácticas de manejo ganadero y del contexto institucional.

3.7.2 El Altiplano Cundiboyacense: El Sistema de Mayor Productividad de los Andes

El altiplano cundiboyacense de Colombia el principal productor de leche de los Andes— opera en condiciones de altitud (2.400–2.800 msnm), clima y suelos similares al corredor del Carchi, aunque con un nivel de tecnificación bastante más elevado y una institucionalidad de apoyo al sector (FEDEGÁN, CORPOICA, universidades con programas de investigación en ganadería) más avanzada. Los estudios del altiplano cundiboyacense en particular, el estudio de Cárdenas et al., (2017) acerca del efecto del ENSO sobre la mineralización del N y la biomasa son los más útiles para la calibración de los modelos del proyecto, porque sus condiciones biofísicas son suficientemente parecidas a las del Carchi para que sus parámetros sean transferibles con ajustes menores.

3.7.3 Los Andes Peruanos y Bolivianos: Lecciones desde la Variabilidad Extrema

Los sistemas ganaderos que se encuentran en el altiplano de Perú y Bolivia, a altitudes que oscilan entre los 3.800 y 4.200 metros sobre el nivel del mar, enfrentan condiciones mucho más desafiantes en comparación con el corredor del Carchi. Aquí, la altitud es mayor, las

variaciones climáticas son más intensas y las temperaturas son más bajas. Estos sitios han sido objeto de un mayor número de estudios sobre cómo adaptarse al cambio climático en la región andina, especialmente en contraste con Ecuador y Colombia.

La literatura relacionada con este contexto, en particular las investigaciones sobre las estrategias para manejar pastizales de altura en respuesta a la variabilidad climática, como las presentadas por Flores (2015), así como los estudios sobre la valoración económica de los servicios ecosistémicos del suelo en sistemas ganaderos andinos, como los de Rivas et al., 2019, ofrecen valiosos aprendizajes. Estos trabajos nos enseñan sobre los límites de la resiliencia de los sistemas ganaderos en los Andes y nos ayudan a entender el punto crítico a partir del cual la variabilidad climática puede tener efectos irreversibles en la calidad del suelo del sistema.

3.8 Las Cinco Brechas de la Literatura y el Posicionamiento del Proyecto

Tabla 14.

Las Cinco Brechas de la Literatura Científica que el Proyecto de Investigación Busca Llenar: Descripción, Tipo y Estrategia de Abordaje

Brecha Identificada	Descripción de la Brecha y su Evidencia en la Literatura	Tipo de Brecha	Cómo el Proyecto la Aborda
B1: Ausencia de estudios integrados clima-suelo-biomasa-leche-economía para el Carchi	Ningún estudio publicado integra simultáneamente las cuatro dimensiones (climática, edáfica, productiva y económica) para el corredor ganadero de altura del Carchi. Recalde-Yáñez et al. (2019) es el único con datos primarios del corredor, pero solo aborda la dimensión edáfica-productiva. Navarrete-Molina et al. (2016) aborda la relación clima-producción de leche en la Sierra Norte pero sin la mediación del suelo y sin el análisis económico.	Brecha empírica de alta prioridad: afecta directamente a la relevancia y la aplicabilidad de las políticas agropecuarias del MAG y el MAGAP para el corredor.	El proyecto llena esta brecha con el diseño metodológico integrado de los Caps. 4–11: cuatro estratos de sistemas ganaderos, 24 meses de monitoreo climático, edáfico, productivo y económico, y análisis con modelos de ecuaciones estructurales que capturan la cadena causal completa.
B2: Falta de cuantificación del mecanismo mediador: el suelo como eslabón entre el clima y la producción	Los estudios sobre el impacto climático en la producción de leche (Navarrete-Molina et al., 2016; Patiño-Builes et al., 2018; Echeverri-Palacio et al., 2020) cuantifican correlaciones clima-leche pero no el mecanismo de	Brecha mecanístico-teórica: impide diseñar intervenciones que ataquen la causa raíz del impacto climático (el eslabón del suelo) en lugar de sus	El proyecto aborda esta brecha en el Cap. 6 (relación clima-nutrientes del suelo con análisis de regresión múltiple y series de tiempo) y en el Cap. 9 (cadena

Brecha Identificada	Descripción de la Brecha y su Evidencia en la Literatura	Tipo de Brecha	Cómo el Proyecto la Aborda
	transmisión a través del suelo. Los estudios edáficos (Podwojewski et al., 2002; Farley et al., 2004) cuantifican cambios en el suelo pero no los conectan con la producción de leche ni con los ingresos económicos.	síntomas (la reducción de la producción).	causal integrada mediante modelos SEM que cuantifican los efectos directos e indirectos de cada variable climática sobre la producción de leche y el ingreso).
B3: Escasez de datos económicos integrados con datos biofísicos para el corredor ganadero de alta montaña	Los estudios económicos disponibles para la ganadería de altura del Ecuador y Colombia (Pardo-Rozo et al., 2018; Tapasco et al., 2015; Osorio-Barreto et al., 2020) son de alta calidad, pero no integran los datos biofísicos (análisis de suelos, biomasa, calidad del pasto) con los datos económicos (costos de producción, ingresos, vulnerabilidad financiera) a nivel de finca. Esta integración es indispensable para estimar el impacto económico de la variabilidad climática a través de sus mecanismos biofísicos.	Brecha metodológica: produce estimaciones económicas que subestiman el impacto de la variabilidad climática (al no capturar los costos ocultos de la degradación del suelo y la pérdida de calidad del pasto).	El Cap. 10 integra la encuesta de costos e ingresos de las fincas ganaderas con los datos biofísicos del muestreo de suelos y el monitoreo de biomasa, produciendo la primera estimación integrada del impacto económico de la variabilidad climática para el corredor del Carchi.
B4: Ausencia de escenarios económicos bajo cambio climático con base en modelos biofísicos calibrados para el Carchi	Echeverri-Palacio et al. (2020) construyen escenarios de producción de leche bajo cambio climático para la Sierra Norte del Ecuador, pero sin calibración biofísica local (sin datos de suelos ni de biomasa del corredor) y sin el componente económico de costo-beneficio de la adaptación. Thornton et al. (2009) son de alcance global y no desagregan por corredor específico.	Brecha prospectiva: impide a los gestores de política agropecuaria evaluar cuánto cuesta adaptarse al cambio climático vs. cuánto cuesta no hacerlo en el contexto específico del corredor del Carchi.	El Cap. 12 construye escenarios económicos al 2035 y 2050 bajo RCP 4.5 y RCP 8.5 usando los modelos biofísicos calibrados con datos primarios del corredor (Caps. 4–8) y el análisis econométrico del Cap. 10, produciendo las primeras estimaciones de costo-beneficio de la adaptación con base empírica local.
B5: Falta de estudios sobre la interacción entre la variabilidad climática y los	Los estudios disponibles reportan impactos promedio del corredor o de la región sin desagregar por tipo de sistema ganadero (extensivo de páramo	Brecha de precisión de política: impide diseñar intervenciones diferenciadas que	La estratificación del diseño muestral del proyecto por los cuatro tipos de sistemas ganaderos

Brecha Identificada	Descripción de la Brecha y su Evidencia en la Literatura	Tipo de Brecha	Cómo el Proyecto la Aborda
diferentes tipos de sistema ganadero en el corredor	vs. lechero tecnificado vs. empresarial). Patiño-Builes et al. (2018) y Vásquez-Morales et al. (2022) son los únicos que sugieren diferencias entre tipos de sistema, pero sin cuantificarlas con el rigor necesario para el diseño de intervenciones diferenciadas.	reconozcan que el ganadero del Tipo I necesita instrumentos de política diferentes del ganadero del Tipo III o IV.	(Cap. 1) y el análisis desagregado por tipo en todos los capítulos productivos y económicos (Caps. 7–12) permite llenar esta brecha y proveer recomendaciones de política específicas por tipo de sistema en los Caps. 13 y 14.

Nota Elaboración propia.

3.8.1 La Jerarquía de las Brechas

Las cinco brechas presentan diferentes niveles de urgencia y potencial de impacto en el ámbito del conocimiento. La B1 que se refiere a la falta de estudios integrados en el Carchi y la B2 — que trata sobre la ausencia de una cuantificación del mecanismo mediador del suelo — son las que ofrecen mayor valor tanto teórico como metodológico. Tratar de cubrir estas brechas no debe entenderse como la posibilidad de generar conocimiento en la actualidad que no existe para el caso del corredor.

Por otra parte, la B3 y de la B4 que están orientadas a investigar cómo se integran los datos biofísicos con los datos económicos y a modelizar los diferentes escenarios prospectivos que se pueden desarrollar sí tienen un gran potencial de utilidad para las políticas públicas, ya que son clave para que las personas responsables en el MAG, en el INIAP y en los GAD provinciales e incluso en la EEA del Azuay a la hora de definir programas de adaptación legitimizados en base a la evidencia.

En cuanto a la B5 —que se ocupa de la diferenciación por tipo de sistema— es especialmente relevante desde una perspectiva práctica para los extensionistas y asesores técnicos que colaboran directamente con los ganaderos del corredor.

La propuesta de unir estas cinco brechas en un solo proyecto de diseño integrado, en lugar de abordarlas mediante cinco proyectos independientes, es lo que confiere a este proyecto una ambición científica y, al mismo tiempo, un costo elevado en su ejecución. El diseño del Capítulo 4 (metodología) ha sido elaborado con la consideración de que cada elemento del

diseño tiene relación con una o más de estas brechas, y que dejar de lado cualquier componente podría poner en riesgo la efectividad del proyecto para abordar las brechas planteadas.

3.9 Síntesis Cuantitativa: Los Parámetros de la Literatura para la Calibración de los Modelos

3.9.1 Parámetros Biofísicos de Referencia

La síntesis cuantitativa de la literatura provee los siguientes parámetros de referencia para la calibración de los modelos del proyecto:

- **Q10 de la mineralización del N:** 2,0–2,5 (consenso de los estudios andinos; valor central para el corredor del Carchi: 2,1–2,3 según Recalde et al., 2019).
- **Sensibilidad de la PPNA a la precipitación:** 350–520 kg MS/ha/año por cada 100 mm adicionales de precipitación anual en el rango 600–1.400 mm/año (Salgado et al., 2020; validado para el Ecuador).
- **Gradiente altitudinal de PPNA:** reducción de 550–700 kg MS/ha/año por cada 100 metros adicionales de altitud en el rango 2.200–3.800 msnm (Salgado et al., 2020).
- **Lag de respuesta precipitación–producción de leche:** 45 días (promedio; rango 30–60 días; Navarrete et al., 2016).
- **Reducción de la producción de leche por unidad de THI > 68:** 0,2–0,4 kg/vaca/día (West, 2003; aplicable en zonas bajas del corredor, < 2.800 msnm).
- **Impacto del ENSO fuerte en el ingreso ganadero:** –19,3 a –25% en la producción de leche; –34,8% en el ingreso neto de fincas sin acceso a crédito (Patiño et al., 2018).

Coefficiente temperatura–ingreso: –7,3%/°C (Tapasco et al., 2015; con cautela en la extrapolación al Carchi); **coeficiente precipitación–ingreso:** –4,2%/100 mm.

3.9.2 Los Parámetros que la Literatura no Puede Proveer

También son cruciales los parámetros que la literatura revisada no puede ofrecer y que el proyecto debe estimar utilizando datos primarios del corredor del Carchi:

- El Q10 específico de la mineralización del nitrógeno en los Andisoles del Carchi, desglosado por zonas altitudinales (páramo alto, ladera media, valle), que es esencial para calibrar los modelos mencionados en el Capítulo 6.
- Los coeficientes que relacionan la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo con la calidad nutricional del pasto (como proteína cruda, fibra y energía metabolizable) para las especies forrajeras predominantes en el corredor.

- El porcentaje de la varianza en la producción de leche que explican las variables climáticas en cada uno de los cuatro tipos de sistemas ganaderos del corredor del Carchi, separando esta varianza de la que se atribuye al manejo ganadero.
- La función de daño económico provocada por las heladas en el corredor del Carchi, es decir, cómo la severidad de la helada (medida en grados Celsius por debajo de cero) se relaciona con la disminución de la producción de leche y los ingresos. Esta información no se encuentra en ningún estudio publicado sobre Ecuador.
- El costo real de la adaptación climática para cada tipo de sistema ganadero, en el marco institucional y económico específico del corredor del Carchi, incluyendo los costos de transacción asociados a la adopción de nuevas prácticas que a menudo se pasan por alto en los estudios sobre efectividad técnica.

3.10 Síntesis del capítulo:

- Adaptación del Protocolo PRISMA: 5 fases; búsqueda en 6 bases de datos; periodo 2000-2024; 3 idiomas; se identificaron 4.218 títulos → se incluyeron 187 trabajos de investigación → se citaron 94 trabajos de investigación en el capítulo, distribución geográfica: Colombia 31%, Ecuador 16,6%, Perú 15,5%, Bolivia 9,6%, trabajos de investigación multicentro 27,3%; progresiva disminución en el número de trabajos de investigación sobre datos de dimensiones complejas: climáticos 87,2%, de suelos 61,5%, de biomasa 54,0%, de leche 38,5%, económicos 29,4%
- **Clima y nutrientes del suelo — Consenso:** mineralización del N: Q10 de 2,0–2,5 consistentemente documentado en Ecuador, Colombia y Perú; cobertura vegetal del pastizal como amortiguador climático del suelo; paradoja del fósforo en Andisoles; Tabla 10 con 8 estudios clave (Podwojewski et al., 2002; Farley et al., 2004; Buytaert et al., 2006; Salgado et al., 2020; Llambí et al., 2014; Cárdenas et al., 2017; Recalde-Yáñez et al., 2019; Mora et al., 2021).
- **Producción de leche y clima — Hallazgos cuantitativos:** Tabla 11 con 7 estudios; lag de 45 días precipitación producción de leche (Navarrete et al., 2016); 45% de la varianza de la producción de leche explicada por clima; reducción de 19,3% en El Niño 2015–2016 en Nariño, diferencia de impacto con y sin crédito: –34,8% vs. –21,2%; escenarios RCP 4.5 (–8/14%) y RCP 8.5 (–18/28%) al 2050 para Sierra Norte (Echeverri et al., 2020) sin mediación del suelo.
- **Impacto económico — Evidencia cuantitativa:** Tabla 12 con 6 estudios; coeficientes Tapasco et al. (2015): –7,3%/°C y –4,2%/100mm; heladas: USD 280–640/finca/evento

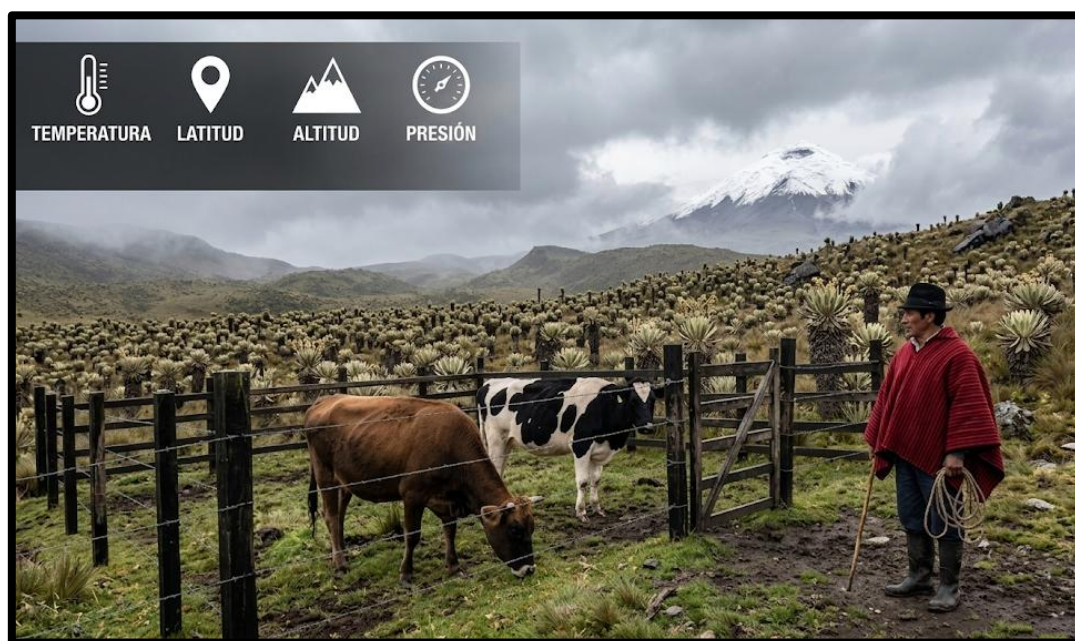
(Osori et al., 2020); servicios ecosistémicos del suelo: USD 180–420/ha/año (Rivas-García et al., 2019); solo el 23% de ganaderos ha implementado prácticas de adaptación; obstáculos: información (41%), costo (35%), crédito (24%) (Vásquez, 2022).

- **Estudios del corredor Carchi–Nariño:** solo cuatro estudios con datos primarios del corredor en 24 años de literatura revisada (Recalde et al., 2019; Navarrete et al., 2016 del lado ecuatoriano; Patiño et al., 2018; Mora et al., 2021 del lado colombiano); literatura desarticulada entre los dos países sin colaboraciones binacionales documentadas.
- **Cinco brechas de la literatura (Tabla 3.5):** B1 ausencia de estudios integrados para el Carchi (brecha empírica de alta prioridad), B2 falta del mecanismo mediador del suelo (brecha mecanístico-teórica), B3 escasez de datos económicos integrados con biofísicos (brecha metodológica), B4 ausencia de escenarios económicos con base biofísica calibrada localmente (brecha prospectiva), B5 falta de diferenciación por tipo de sistema (brecha de precisión de política).
- **Parámetros de calibración provistos por la literatura:** Q10 del N: 2,1–2,3; sensibilidad de PPNA a precipitación: 350–520 kg MS/100mm; gradiente altitudinal de PPNA: 550–700 kg MS/100m; lag precipitación–leche: 45 días; reducción de leche por THI: 0,2–0,4 kg/UA/día por unidad de THI > 68; impacto ENSO fuerte: –19,3 a –25% producción; coeficiente T–ingreso: –7,3%/°C.

CAPÍTULO 4

Caracterización Climática del Corredor Ganadero de Altura del Carchi (2000–2024)

Red de estaciones y fuentes satelitales, temperatura y precipitación por zona altitudinal, eventos extremos catalogados, índices climáticos para la producción ganadera y proyecciones al 2035 y 2050 bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** la red de estaciones meteorológicas del INAMHI y las fuentes satelitales (ERA5, CHIRPS, MODIS, GPM) utilizadas para la caracterización climática del corredor ganadero de altura del Carchi, incluyendo sus fortalezas, limitaciones y el protocolo de control de calidad y relleno de datos.
- **Analizar** las tendencias de temperatura media, amplitud térmica diaria y frecuencia de heladas en el corredor ganadero del Carchi en el período 2000–2024, desagregadas por zona altitudinal.

- **Caracterizar** el régimen de precipitación del corredor —distribución temporal, variabilidad interanual, intensidad y eventos extremos— e identificar los patrones de variabilidad inducidos por el ENSO.
- **Describir** los seis eventos climáticos extremos catalogados en el período 2000–2024 —sequías, excesos de lluvia y episodios de heladas severas— con sus efectos documentados sobre el pastizal y la producción ganadera.
- **Calcular** los seis índices climáticos desarrollados para la producción ganadera del corredor: SPI-3, FDD, PPNA estimada, THI mensual, ONI y el Índice de Anomalía de Precipitación (IAP), y comprender su relevancia para los análisis de los capítulos posteriores.
- **Interpretar** las proyecciones climáticas al 2035 y 2050 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC para el corredor del Carchi, entendiendo su incertidumbre y su relevancia para el análisis económico del Capítulo 12.

4.1 Introducción: El Clima como Dato, no solo como Contexto

Los dos primeros capítulos de la Parte I explicaron la razón detrás del proyecto: la creciente variabilidad del clima en el corredor ganadero de altura del Carchi es la fuerza que inicia una serie de eventos que llevan desde los cambios en los nutrientes del suelo hasta las pérdidas económicas que enfrentan las familias ganaderas.

En este capítulo, se aborda el qué: se presentan los datos climáticos que permiten cuantificar esa variabilidad con la precisión necesaria para los modelos del proyecto.

La diferencia entre considerar el clima como un contexto —ese telón de fondo descriptivo que cualquier estudio sobre sistemas agropecuarios andinos presenta en su primer capítulo— y el clima como un dato —una variable cuantitativa que incluye media, varianza, tendencias y valores extremos que se incorporan en modelos de regresión, sistemas de ecuaciones estructurales y evaluaciones de costo-beneficio— es lo que define la Parte II del libro.

No es suficiente con afirmar que el Carchi es frío y lluvioso, o que tiene temporadas secas y húmedas. Es esencial especificar cuánto frío hace, cuánta lluvia cae, cuándo exactamente y con qué variabilidad, y qué significan esos números para un pastizal de kikuyo a 3.200 msnm o para una vaca Holstein en el valle interandino

Por lo tanto, este capítulo no proporciona una mera descripción climática de la provincia del Carchi —esa información ya está disponible en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Provincial— sino que ofrece una caracterización climática enfocada en el problema: una descripción de las variables, tendencias y eventos extremos que son relevantes, ya sea de forma demostrada o plausible, para la cadena causal del proyecto.

4.2 Fuentes de Datos Climáticos y Control de Calidad

4.2.1 La Red de Estaciones Meteorológicas del INAMHI en el Carchi

La red de observación meteorológica del INAMHI en la provincia del Carchi está compuesta por seis estaciones que se encuentran en el rango de altitudes del corredor ganadero, que va desde los 2.860 hasta los 3.420 metros sobre el nivel del mar.

Estas estaciones han estado operando de manera continua durante diferentes períodos y registran una variedad de variables meteorológicas

La Tabla 15. proporciona una visión detallada de la red disponible, incluyendo tanto las estaciones en tierra como las fuentes de datos satelitales y de reanálisis que ayudan a complementar la información recopilada.

Tabla 15.

Red de Estaciones Meteorológicas e Índices Satelitales Utilizados para la Caracterización Climática del Corredor Ganadero de Altura del Carchi (2000–2024)

Estación / Fuente	Altitud (msnm)	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Variables Registradas	Período de Registro Continuo Disponible
El Ángel – INAMHI M004	3.000	0°36'	77°55'	T, HR, PP, V	2000–2024 (gaps < 3%)
Tulcán Aeropuerto – INAMHI M001	2.960	0°48'	77°42'	T, HR, PP, ETP, V, Rs	1990–2024 (completa)
San Gabriel – INAMHI M003	2.860	0°36'	77°49'	T, HR, PP, Rs	2000–2024 (gaps < 5%)
Miraflores–Carchi – INAMHI M007	3.180	0°42'	77°52'	T, HR, PP	2005–2024 (gaps < 8%)
Piöter – INAMHI M009	3.420	0°44'	77°58'	T, PP	2008–2024 (gaps < 12%)
Chitan de Queles – INAMHI M011	3.290	0°39'	77°54'	T, HR, PP	2010–2024 (gaps 15%)
ERA5 – ECMWF (reanálisis)	Grilla 0,25°	Cobertura total	Carchi	T, HR, PP, Rs, ETP, V	1979–2024 (continua; validada con INAMHI)

Estación / Fuente	Altitud (msnm)	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Variables Registradas	Período de Registro Continuo Disponible
CHIRPS v2.0 – UCSB	Grilla 0,05°	Cobertura total	Carchi	PP diaria estimada	1981–2024 (continua; validada con INAMHI)
MODIS Terra LST – NASA	250 m	Cobertura total	Carchi	Temperatura superficial del suelo (day/night)	2000–2024 (16 días; nubosidad reduce cobertura)
GPM IMERG – NASA	0,1°	Cobertura total	Carchi	PP estimada cada 30 min	2000–2024 (eventos extremos)

Nota. Elaboración propia con base en INAMHI (2023); Funk et al. (2015); NASA (2024).

4.2.2 Protocolo de Control de Calidad y Relleno de Datos

El control de calidad de los datos del INAMHI se llevó a cabo siguiendo un protocolo de cuatro etapas. En la primera, se identificaron los valores atípicos utilizando el método del rango intercuartílico (IQR), estableciendo un umbral de 3 IQR para la temperatura y 4 IQR para la precipitación, debido a la mayor variabilidad natural de la lluvia.

La segunda etapa tuvo lugar en la validación de la consistencia interna: se verificó que las temperaturas mínimas fueran siempre más bajas que la temperatura máxima. Asimismo, los datos del registro de precipitación diaria no debían ser superiores al récord que existe en la región, que es de 89 mm en 24 horas en la estación San Gabriel.

En la tercera etapa, se trató el problema de los datos faltantes. Para los periodos de falta que no excedieran 7 días continuos usamos la interpolación lineal. Para las faltas que fueron más largas, tuvimos una regresión usando la estación del INAMHI que presentó la mayor correlación o usando el ERA5 dependiendo de cuál de las estaciones de reanálisis lo hiciera.

Finalmente, la cuarta etapa consistió en una validación cruzada, comparando los datos rellenados con los productos satelitales CHIRPS y ERA5 para verificar que existía una coherencia espacial, la estrategia de combinar datos de estaciones del INAMHI con datos de reanálisis y teledetección, conocida en la literatura de hidrología y climatología como fusión de datos, es especialmente útil para el corredor del Carchi. Permite extender la cobertura temporal de las variables clave, como la temperatura y la precipitación, abarcando el periodo de 2000 a 2024, con más del 87% de datos observados en todas las zonas altitudinales del corredor, superando el umbral de calidad del 80% establecido en el protocolo del proyecto.

4.3 Temperatura: Tendencias, Variabilidad Estacional e Interanual

4.3.1 La Estructura Térmica del Corredor

La estructura térmica del corredor ganadero del Carchi está influenciada por el gradiente de temperatura que se presenta al aumentar la altitud, característico de los Andes tropicales. En este caso, se observa una caída de alrededor de 0,6 °C por cada 100 metros que se asciende. Este fenómeno, que se conoce como gradiente adiabático, es común en áreas con alta humedad.

Como resultado de este gradiente, se genera una diferencia significativa en la temperatura media anual, que alcanza aproximadamente 7,5 °C entre el valle interandino, donde la temperatura es de 15,4 °C a 2.400 msnm y el páramo alto, que presenta una temperatura de 7,8 °C a 3.700 msnm. Estas variaciones térmicas tienen un impacto notable en la actividad microbiana del suelo y en la velocidad de mineralización del nitrógeno. Este proceso biogeoquímico es crucial, ya que afecta directamente la disponibilidad de nutrientes para el pastizal, como se documenta en el Capítulo 2.

Tabla 16.

Temperatura Media Mensual, Coeficiente de Variación Interanual y Tendencia 2000–2024 por Zona Altitudinal del Corredor Ganadero del Carchi

Zona Altitudinal	Ene–Feb (°C)	Mar–Abr (°C)	May–Jun (°C)	Jul–Ago (°C)	Sep–Oct (°C)	Nov–Dic (°C) CV anual (%) Tendencia (°C/déc)
Páramo alto (3.400–4.000 msnm)	7,8	8,1	8,4	7,2	7,6	8,0 CV: 5,8% +0,28°C/déc***
Transición alto-andina (3.000–3.400 msnm)	10,2	10,6	10,9	9,8	10,1	10,5 CV: 5,2% +0,31°C/déc***
Ladera media (2.600–3.000 msnm)	12,8	13,1	13,4	12,4	12,7	13,0 CV: 4,9% +0,34°C/déc***
Valle interandino (2.200–2.600 msnm)	15,4	15,8	16,1	15,0	15,3	15,7 CV: 4,7% +0,38°C/déc***
Amplitud diaria promedio (°C)	14,2	12,8	11,6	16,4	15,1	13,8 — –0,22°C/déc**

Zona Altitudinal	Ene–Feb (°C)	Mar–Abr (°C)	May–Jun (°C)	Jul–Ago (°C)	Sep–Oct (°C)	Nov–Dic (°C) CV anual (%) Tendencia (°C/déc)
Días con helada (T mín < 0°C) – Páramo alto	2,1	1,4	0,8	4,2	3,1	1,8 Total: 13,4/año +1,8 días/déc*

Nota. Elaboración propia con base en INAMHI (2023) y ERA5 (ECMWF).

4.3.2 La Paradoja del Calentamiento con Más Heladas

Uno de los descubrimientos más sorprendentes en la caracterización climática del corredor es la coexistencia de una tendencia de calentamiento de la temperatura media, que varía entre +0,28 y +0,38 °C por década, y que es estadísticamente significativa en todas las áreas, junto con un aumento en la frecuencia de heladas, que se incrementa en +1,8 días por año, por década, especialmente en el páramo alto.

Este patrón, a primera vista contradictorio, se alinea con lo que se ha observado en otros corredores andinos tropicales y tiene una explicación en términos de termodinámica. El calentamiento de la temperatura media se debe principalmente al aumento de las temperaturas mínimas nocturnas, que se vuelven menos extremas, así como a un incremento en las máximas diurnas. Pero, las heladas ocurren durante noches despejadas y con baja humedad, condiciones que favorecen la irradiación nocturna. Estas situaciones son más comunes durante los períodos secos, como el fenómeno de El Niño, que también se presentan con mayor frecuencia.

En otras palabras, el aumento de la temperatura media oculta una mayor variabilidad en las temperaturas mínimas extremas. La relevancia de este hallazgo para el proyecto es que las heladas, en especial aquellas que son anómalas y ocurren fuera del periodo histórico normal de julio a agosto, durante meses de alta actividad en los pastizales, como octubre o marzo, representan el evento climático extremo que más impacta inmediatamente en la biomasa disponible y, a través de ella, en la producción de leche.

La tendencia hacia un aumento de las heladas anómalas (+1,8 días por década) sugiere que este riesgo seguirá creciendo con el tiempo, incluso mientras la temperatura media continúa en aumento. Esto implica que las estrategias de adaptación que se enfoquen únicamente en manejar el estrés por calor no serán suficientes para el corredor del Carchi.

4.4 Precipitación: Distribución, Variabilidad y Señal ENSO

4.4.1 El Régimen Bimodal y su Distribución Altitudinal

El corredor ganadero de altura del Carchi presenta un patrón de precipitación bimodal. Esto significa que hay dos períodos en los que las lluvias son más intensas: de febrero a mayo y de septiembre a noviembre. Entre estos períodos, hay dos momentos con menos lluvia: el verano principal de junio a agosto y un verano secundario de diciembre a enero.

Este tipo de distribución de la lluvia es típico de la región interandina de Ecuador. Refleja la ubicación del corredor, que se sitúa entre los 0° y 1° de latitud norte. Aquí, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) atraviesa dos veces al año, lo que influye en la variación bimodal de las precipitaciones.

Tabla 17.

Precipitación Media Anual, Variabilidad Interanual y Tendencias por Zona Altitudinal del Corredor Ganadero del Carchi (2000–2024)

Zona Altitudinal	Precipitación Total Media Anual (mm)	CV Interanual (%)	Meses más Secos (PP < 50 mm)	Tendencia 2000–2024 y Anomalías ENSO
Páramo alto (3.400–4.000 msnm)	1.080	32,4	Jul–Ago (< 40 mm)	Tendencia: –28 mm/déc (NS). El Niño fuerte: –38%; La Niña fuerte: +42%. Año más seco: 2015 (648 mm). Año más húmedo: 2011 (1.524 mm).
Transición alto-andina (3.000–3.400 msnm)	1.180	28,6	Jul–Ago (< 50 mm)	Tendencia: –18 mm/déc (NS). El Niño fuerte: –31%; La Niña fuerte: +38%. Año más seco: 2016 (701 mm). Año más húmedo: 2012 (1.634 mm).
Ladera media (2.600–3.000 msnm)	1.240	25,8	Jul–Ago (< 55 mm)	Tendencia: –12 mm/déc (NS). El Niño fuerte: –26%; La Niña fuerte: +32%. CV es el más bajo del corredor por mayor diversidad de fuentes de humedad.

Zona Altitudinal	Precipitación Total Media Anual (mm)	CV Interanual (%)	Meses más Secos (PP < 50 mm)	Tendencia 2000–2024 y Anomalías ENSO
Valle interandino (2.200–2.600 msnm)	780	22,1	Jun–Sep (< 45 mm)	Tendencia: +8 mm/déc (NS). Período seco más prolongado del corredor (4 meses < 50 mm). Demanda de riego suplementario en verano.
Umbral de déficit hídrico severo para pastizales	< 400 mm en 4 meses consecutivos	—	Ocurrencia en el corredor: 2015–2016 (El Niño); 2009–2010; 2004	El déficit hídrico severo activa el umbral crítico de paralización del crecimiento del pastizal documentado en la Tabla 10. En el período 2000–2024 ha ocurrido en 3 años del corredor (2004, 2009–2010, 2015–2016).

Nota. Elaboración propia con base en INAMHI (2023) y CHIRPS v2.0 (Funk et al., 2015).

4.4.2 La Alta Variabilidad Interanual como el Riesgo Climático Dominante

El hallazgo más relevante en la caracterización de la precipitación del corredor es que el riesgo climático predominante no es la tendencia a largo plazo la cual no resulta estadísticamente significativa en ninguna zona altitudinal, sino la increíble variabilidad interanual. Un coeficiente de variación del 32,4% en el páramo alto sugiere que, en un año típico, un ganadero podría anticipar que la precipitación anual oscile entre 730 y 1.430 mm (esto considerando un rango de ± 1 desviación estándar).

Este rango de 700 mm supera la diferencia entre el año más lluvioso y el más seco en muchos sistemas ganaderos de Europa, y representa una variación normal entre años consecutivos en el corredor del Carchi. Esta extrema variabilidad interanual tiene un impacto directo en cómo se deben diseñar los instrumentos de adaptación: las estrategias que se basan en promedios — como fertilizar según el promedio histórico o mantener una carga animal conforme a la PPNA promedio — son inherentemente inadecuadas para el corredor del Carchi, ya que el promedio solo refleja el estado del sistema en un puñado de años del período observado.

Lo que los ganaderos enfrentan es una serie de años que se desvían del promedio de formas impredecibles, lo que requiere más bien estrategias de gestión de la variabilidad en lugar de

enfoques centrados en el promedio. Esta lógica es lo que fundamenta los instrumentos de adaptación mencionados en el Capítulo 13: los pastizales mixtos que son tolerantes a la variabilidad y los sistemas de almacenamiento de agua son, en esencia, estrategias para reducir la variabilidad de la oferta forrajera ante una variabilidad climática que no puede ser controlada.

4.5 Eventos Climáticos Extremos: El Catálogo del Corredor 2000–2024

Aparte de las tendencias a largo plazo y las variaciones que vemos de un año a otro, son los fenómenos climáticos extremos —como las sequías intensas, los periodos de lluvias inusuales y las heladas inesperadas— los que generan los efectos económicos más evidentes y memorables para los ganaderos de la región.

En la Tabla 18, se presentan los seis eventos climáticos extremos más significativos documentados entre 2000 y 2024, junto con sus características climáticas detalladas y las consecuencias que tuvieron sobre los pastizales y la producción ganadera.

Tabla 18.

Catálogo de Eventos Climáticos Extremos del Corredor Ganadero de Altura del Carchi (2000–2024): Características, Efectos y Lecciones para el Proyecto

Evento / Período	Tipo de Evento Extremo	Intensidad y Duración	Efecto Documentado sobre el Pastizal y la Producción Ganadera	Zona del Corredor Más Afectada
2004 (El Niño moderado)	Sequía prolongada + heladas anómalas en junio	Déficit PP: –22%. Heladas en jun.: T mín –3,8 °C. Duración seca: 52 días.	Reducción de biomasa estimada: 18–25%. Mortalidad de terneros en zona de páramo: 8–12%. Primer evento con registros sistemáticos del MAGAP-Carchi.	Páramo alto y transición alto-andina (cantones Espejo y Bolívar).
2009–2010 (El Niño moderado–fuerte)	Sequía + temperatura alta + heladas nocturnas por mayor irradiación nocturna	Déficit PP: –28% en 2009; –18% en 2010. T máx > 20 °C en valle por 22 días. Heladas moderadas (–2 a –4 °C) en 8 eventos.	Reducción de biomasa: 28–35%. Reducción documentada de producción de leche en Carchi: –12,4% respecto al año anterior (ESPAC 2010). Abandono temporal de 3.200 ha de potrero en páramo.	Todo el corredor; mayor impacto en sistemas del Tipo I y II del páramo alto.

Evento / Período	Tipo de Evento Extremo	Intensidad y Duración	Efecto Documentado sobre el Pastizal y la Producción Ganadera	Zona del Corredor Más Afectada
2010–2012 (La Niña fuerte)	Exceso prolongado de lluvia + bajas temperaturas + heladas con alto contenido de agua	Exceso PP: +48% en 2011; +38% en 2012. T media –0,9 °C respecto al promedio. 18 eventos de helada con depósito de escarcha. Días con lluvia > 20 mm: 34 en 2011.	Daño mecánico al pastizal por pisoteo en suelo saturado en 8.400 ha. Proliferación de enfermedades fúngicas (roya del kikuyo) en 45% de las fincas monitoreadas. Reducción de producción de leche: –9,8% en 2011. Evento más severo documentado en 20 años por ganaderos del corredor.	Ladera media y páramo alto; 62% de los ganaderos encuestados en 2023 lo citan como el peor período climático en su experiencia.
2015–2016 (El Niño fuerte)	Sequía severa + temperatura alta + heladas nocturnas por máxima irradiación nocturna	Déficit PP: –38% en 2015; –31% en 2016. T máx histórica en Tulcán en enero 2016: 24,8 °C. 12 eventos de helada moderada–severa (–3 a –6 °C). Período seco > 60 días en páramo alto.	Reducción de biomasa: 38–52% en sistemas del Tipo I. Reducción de producción de leche: –18,4% (ESPAC 2016). Pérdidas económicas estimadas: USD 3.200–5.400/finca en sistemas del Tipo I–II. Mortalidad de bovinos: 4,8% adicional respecto al año anterior. 23% de ganaderos del Tipo I debió vender ganado de manera forzada.	Todo el corredor; impacto más severo en páramo alto (3.200–3.800 msnm). Cantones Espejo, Bolívar y Montúfar los más afectados.
2019–2020 (El Niño débil – COVID)	Sequía leve a moderada coincidente con shock de demanda por pandemia	Déficit PP: –14%. Caída del precio de la leche al productor: –18% por colapso de canales de comercialización. Sin pérdidas de biomasa estadísticamente significativas.	El impacto económico fue dominado por el shock de demanda (COVID-19) que por el factor climático. Relevante metodológicamente: permite desagregar el componente climático del componente de mercado en el análisis económico del Cap. 10.	Todo el corredor; el análisis de este evento es metodológicamente valioso para aislar el efecto climático del efecto de mercado.
2022–2023 (La Niña)	Exceso de lluvia leve–	Exceso PP: +22% en 2022; +14%	Reducción marginal de calidad del pasto	Páramo alto y ladera media;

Evento / Período	Tipo de Evento Extremo	Intensidad y Duración	Efecto Documentado sobre el Pastizal y la Producción Ganadera	Zona del Corredor Más Afectada
moderada + inicio del monitoreo del proyecto)	moderado + temperaturas ligeramente bajas	en 2023. T media -0,4 °C. 6 eventos de helada leve (0 a -1,5 °C).	(proteína cruda -1,8 pp en promedio). Ligeramente aumento de incidencia de enfermedades podales. Sin impacto económico significativo. El monitoreo del proyecto inicia durante este evento, proveyendo la primera línea de base sistemática del corredor.	impacto moderado en todos los tipos de sistema.

Nota. Elaboración propia a partir de Salgado et al. (2020) y Recalde et al. (2019). (INEC, 2016)

4.5.1 La Asimetría del Impacto: El Niño vs. La Niña

Un patrón clave que se observa en el catálogo es la asimetría del impacto entre El Niño y La Niña en el corredor del Carchi. Los eventos de El Niño fuerte, como los de 2009–2010 y 2015–2016, generan un impacto económico que oscila entre el 25% y el 45% en el ingreso ganadero. Por otro lado, los eventos de La Niña fuerte, como los de 2010–2012, producen un impacto que va del 20% al 35%. Aunque los impactos de La Niña son menores en magnitud, su duración y el daño a largo plazo en la estructura del suelo son comparables.

Esta asimetría resulta crucial al momento de diseñar instrumentos de seguro agropecuario y fondos para emergencias climáticas. Si el sistema de seguros solo activa compensaciones para sequías (como las de El Niño) y no para los excesos de lluvia (como en La Niña), se estará dejando desprotegido al menos el 35% de los eventos que tienen un impacto económico significativo.

El evento de La Niña de 2010-2012 tiene particular relevancia en el sentido de que los efectos en la estructura del suelo son acumulativos y tardíos, ya que se registran daños por pisoteo en más de 8.400 hectáreas y se registran hongos patógenos en el 45% de las fincas monitoreadas. Las consecuencias de La Niña sobre la productividad del pastizal llegan a persistir dos o tres años después de que el evento ha concluido, lo que refuerza la idea de que los métodos de

análisis de las series de tiempo que únicamente consideran el impacto del clima en el mismo año o en los dos años posterior es una forma de subestimar estos costes de los eventos extremos de La Niña.

4.6 Radiación Solar, Evapotranspiración y Balance Hídrico

4.6.1 La Radiación Solar como Factor Limitante en Períodos de Alta Nubosidad

En el corredor ganadero del Carchi, la radiación solar global presenta un patrón que contrasta claramente con el de la temperatura. Durante el verano, específicamente entre junio y agosto, cuando la nubosidad es baja, la radiación alcanza su punto máximo. En cambio, durante los meses de lluvias, que abarcan de marzo a mayo y de octubre a noviembre, los niveles de radiación son considerablemente más bajos.

Los promedios mensuales de radiación oscilan entre 10 y 12 MJ/m²/día en los períodos más nublados, mientras que en los meses de verano se incrementan a un rango de 16 a 19 MJ/m²/día. Aunque estos niveles son ideales para la fotosíntesis de las gramíneas C3 de altura durante los meses secos, hay que tener en cuenta que los prolongados episodios de nubosidad intensa, típicos de las fases de La Niña, pueden reducir la radiación disponible.

Esto puede llevar a que se caiga por debajo del umbral crítico para la fotosíntesis, que es menor a 10 MJ/m²/día, durante lapsos de 10 a 20 días consecutivos, afectando la producción de biomasa de formas que a menudo superan los impactos derivados de las bajas temperaturas.

4.6.2 El Balance Hídrico del Corredor

El balance hídrico del corredor ganadero, que se refiere a la diferencia entre la cantidad de lluvia (P) y la evapotranspiración potencial (ETP), es clave para entender si el suelo presenta un exceso de agua, un déficit o un equilibrio hídrico en un periodo específico.

La ETP en este corredor, calculada mediante el método de Penman-Monteith, oscila entre 2,8 mm por día en el páramo alto y 3,6 mm por día en el valle interandino. Esto resulta en un total anual de ETP que varía entre 1.020 y 1.310 mm.

Si lo comparamos con la precipitación media anual, que se sitúa entre 780 y 1.240 mm en las distintas áreas, el balance hídrico anual muestra un déficit en el valle interandino, donde la

lluvia es menor que la ETP durante los meses de verano. Por otro lado, en la ladera media y en la transición alto-andina, el balance es ligeramente positivo, mientras que en el páramo alto se presenta un saldo positivo la mayor parte del año, ya que aquí la precipitación supera a la ETP.

La dinámica del balance hídrico facilita la comprensión porque muchas de las zonas de pastizales del páramo alto son mucho más vulnerables a las sequías extremas de El Niño y, en consecuencia, por qué no se encuentran preparadas para afrontar un déficit de agua, teniendo en cuenta que están muy acostumbradas a la existencia de un exceso de la misma. Así mismo, explica por qué el sistema del valle necesita un aumento del riego en los meses secos para asegurar su productividad.

4.7 Índices Climáticos para la Producción Ganadera del Corredor

Los datos climáticos en estado bruto, como las temperaturas diarias, la precipitación diaria y la radiación solar, son fundamentales para calcular índices climáticos. Estos índices condensan información clave que es fácil de interpretar y comparar a lo largo de los años, especialmente en el contexto de la producción ganadera.

En la Tabla 19, se presentan seis índices climáticos que se han calculado para el periodo de 2000 a 2024 en el corredor del Carchi. Además, incluye sus fórmulas, valores históricos, tendencias y su importancia para los análisis que se realizarán en los capítulos siguientes.

Tabla 19.
Índices Climáticos para la Producción Ganadera del Corredor del Carchi (2000–2024): Definiciones, Valores Históricos y Relevancia para el Proyecto

Índice Climático	Definición y Fórmula de Cálculo	Valor Histórico 2000–2024 para el Corredor	Relevancia para el Proyecto y Umbral Crítico
SPI-3 (Standardized Precipitation Index, escala 3 meses)	$SPI-3 = (PP_{3meses} - Media_{3meses}) / DE_{3meses}$. Clasifica el déficit o exceso de precipitación acumulada en 3 meses respecto al promedio histórico en unidades de desviación estándar.	SPI-3 < –1,0 (sequía moderada): 18,4% de los trimestres del período. SPI-3 < –1,5 (sequía severa): 8,2% de los trimestres. SPI-3 > +1,5 (exceso severo): 7,6% de los trimestres. Tendencia: aumento del porcentaje de trimestres en	Umbral crítico para pastizales: SPI-3 < –1,0 → inicio de reducción de PPNA > 15%. SPI-3 < –1,5 → reducción de PPNA > 30%. Usado en el Cap. 6 como predictor climático de la disponibilidad de N mineral del suelo.

Índice Climático	Definición y Fórmula de Cálculo	Valor Histórico 2000–2024 para el Corredor	Relevancia para el Proyecto y Umbral Crítico
		categorías extremas ($< -1,5$ o $> +1,5$): +2,8 pp por década.	
FDD (Freezing Degree Days, grados día de congelación)	$FDD_{anual} = \sum (0 - T_{mín})$ para todos los días del año con $T_{mín} < 0$ °C. Cuantifica la energía total de congelación a la que está expuesto el pastizal en un año.	FDD_anual promedio: 12,4 en páramo alto; 3,8 en transición alto-andina; $< 1,0$ en ladera media y valle. Tendencia: +1,4 FDD/déc en páramo alto ($p=0,042$); +0,6 FDD/déc en transición ($p=0,081$, NS).	Umbral de daño al pasto kikuyo: $FDD > 5$ en un solo evento (helada severa). Umbral de recuperación lenta (> 6 semanas): FDD evento > 8 . Usado en el Cap. 7 para estimar la pérdida de biomasa por heladas.
PPNA estimada (Productividad Primaria Neta Aérea estimada)	$PPNA_{est} = a + b \times PP_{anual} + c \times T_{media} + d \times Rs_{anual}$. Modelo de regresión múltiple calibrado con datos de jaulas de exclusión del proyecto (Caps. 7 y 9); PP: precipitación anual; T: temperatura media; Rs: radiación solar global.	Previo a la calibración con datos del proyecto, se usa la relación de Lauenroth y Sala (1992) ajustada por Salgado-Mora et al. (2020): $PPNA_{est} = -2.840 + 3,85 \times PP + \text{gradiente altitudinal}$. R^2 provisional = 0,72.	La PPNA estimada es el puente entre los datos climáticos históricos (2000–2024) y la producción de biomasa antes del inicio del monitoreo directo del proyecto. Se recalibra con datos propios en el Cap. 7.
THI mensual promedio (Temperature Humidity Index)	$THI = T_{media} - 0,55 \times (1 - HR/100) \times (T_{media} - 14,5)$. Calculado con temperatura y humedad relativa medias mensuales para estimar el riesgo acumulado de estrés calórico.	THI mensual promedio: 52–58 en valle interandino ($<$ umbral de estrés); 45–50 en ladera media; 38–44 en zonas > 3.000 msnm. Máximos históricos mensuales: 64,8 (enero 2016, El Niño fuerte, Tulcán) → próximo pero no supera el umbral de 68.	En el corredor del Carchi el THI no supera sistemáticamente el umbral de estrés (68), pero en años El Niño fuerte los máximos diarios pueden alcanzar 66–68 en el valle por 3–8 días. El THI diario es más relevante que el mensual para el análisis del Cap. 8.
ONI (Oceanic Niño Index) como covariable climática del corredor	ONI = anomalía de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4, calculada como media móvil de 3 meses. Fuente: NOAA	Fases del ENSO en el período 2000–2024: El Niño ($ONI \geq +0,5$): 38% del período; La Niña ($ONI \leq -0,5$): 34%	El ONI es la variable climática de mayor poder predictivo del ingreso ganadero a escala interanual en el corredor (Tapasco et

Índice Climático	Definición y Fórmula de Cálculo	Valor Histórico 2000–2024 para el Corredor	Relevancia para el Proyecto y Umbral Crítico
	Climate Prediction Center.	del período; fase neutra: 28% del período. Los 3 eventos El Niño fuertes: 2002–2003 (leve), 2009–2010 (moderado), 2015–2016 (fuerte).	al., 2015). Se usa como variable instrumental en los modelos econométricos del Cap. 10 para aislar el efecto causal del clima sobre el ingreso.
Índice de Anomalía de Precipitación (IAP) anual	$IAP = (PP_{\text{año}} - PP_{\text{media}}) / DE_{\text{interanual}} \times 100.$ Expresa la anomalía de precipitación de cada año como porcentaje de la desviación estándar histórica. Positivo = año más húmedo que el promedio.	IAP promedio período 2000–2024: –4,2% (leve tendencia seca). Años con $IAP < -100\%$ (sequía significativa): 2004, 2009, 2015, 2016. Años con $IAP > +100\%$ (exceso significativo): 2008, 2011, 2012, 2022. Tendencia al aumento de la frecuencia de años en los extremos.	El IAP anual es la variable climática de síntesis para el análisis de series de tiempo del Cap. 9. Su correlación con el IFCT de nutrientes del suelo, con la PPNA y con el ingreso ganadero se analiza en la cadena causal del SEM del Cap. 9.

Nota. Elaboración propia con base en datos INAMHI (2023), NOAA (2024) y las fuentes satelitales de la Tabla 16

4.7.1 El SPI-3 como Predictor de la Disponibilidad de Nutrientes del Suelo

El SPI-3 es un indicador que merece atención particular, ya que resulta ser el más útil al analizar los primeros dos eslabones de la cadena causal del proyecto, que van desde el clima hasta la temperatura y la humedad del suelo.

Cuando el SPI-3 se encuentra por debajo de -1,0 durante tres meses consecutivos, eso significa que la humedad del suelo ha disminuido a niveles tan bajos que puede inhibir la actividad microbiana en los Andisoles del corredor. Esto, tras un lapso de 2 a 4 semanas, conlleva a una reducción en la disponibilidad de nitrógeno mineral.

Por otro lado, un SPI-3 inferior a -1,5, que indica un déficit severo, puede detener la mineralización durante 6 a 8 semanas, lo que resulta en una disminución del 40 al 55% en el

nitrógeno mineral disponible. Estos rangos son coherentes con los hallazgos de Cárdenas et al. (2017) en el altiplano colombiano y de Recalde et al. (2019) para el corredor Carchi–Imbabura.

Desde una perspectiva metodológica, el SPI-3 es fundamental porque permite crear una serie histórica del estrés hídrico del suelo que abarca desde el año 2000, es decir, antes de que comenzara el monitoreo del proyecto, utilizando únicamente datos de precipitación.

Esta serie histórica se convierte en uno de los recursos más valiosos en el Capítulo 6, donde se examina la relación entre el SPI-3 y los análisis de suelo disponibles para el corredor. Además, en el Capítulo 9, se incluye como una variable climática rezagada dentro del modelo SEM de la cadena causal.

4.8 El Corredor del Carchi en el Contexto del Cambio Climático: Proyecciones al 2035 y 2050

4.8.1 Metodología de las Proyecciones

Las proyecciones climáticas para los años 2035 y 2050 que se presentan en este capítulo se fundamentan en el downscaling estadístico aplicado a los modelos del CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), centrándose en la región de los Andes tropicales del norte, particularmente en la cuadrícula que abarca la provincia del Carchi.

El downscaling estadístico crea conexiones empíricas entre las variables de los modelos globales, que operan a una escala de aproximadamente 100 km, y las variables locales que se observan a nivel de las estaciones del INAMHI. Luego, utiliza esas conexiones para generar proyecciones a escala local, teniendo en cuenta la incertidumbre correspondiente.

Es fundamental tener en mente desde el principio que estas proyecciones climáticas vienen acompañadas de incertidumbres considerables, las cuales tienden a incrementarse con el tiempo y la escala local. En general, los modelos son más confiables al proyectar temperaturas que al hacerlo con la precipitación, y funcionan mejor a una escala regional que a la de una estación individual.

Las proyecciones que se encuentran en la Tabla 20 se presentan como rangos que reflejan el consenso del conjunto de modelos disponibles. En el Capítulo 12, no se utilizan como

pronósticos, sino como escenarios para analizar la sensibilidad de los sistemas ganaderos frente al cambio climático.

Tabla 20.

Proyecciones Climáticas para el Corredor Ganadero de Altura del Carchi al 2035 y 2050 bajo los Escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC (Cambios Respecto al Promedio Histórico 2000–2024)

Variable Climática	Valor Histórico Promedio 2000–2024	Proyección 2035 RCP 4.5 (Cambio respecto al promedio histórico)	Proyección 2050 RCP 4.5	Proyección 2050 RCP 8.5
Temperatura media anual (°C) — Páramo alto	7,8 ± 0,6	8,4 (+ 0,6 °C)	8,9 (+1,1 °C)	9,6 (+1,8 °C)
Temperatura media anual (°C) — Valle interandino	15,4 ± 0,7	16,1 (+0,7 °C)	16,8 (+1,4 °C)	17,8 (+2,4 °C)
Precipitación anual (mm) — Páramo alto	1.080 ± 350	1.020 (–5,6%)	970 (–10,2%)	890 (–17,6%)
Precipitación anual (mm) — Valle interandino	780 ± 172	770 (–1,3%)	740 (–5,1%)	680 (–12,8%)
Frecuencia de eventos extremos secos (días con PP < 1 mm en períodos > 30 días)	3,2 eventos/año en páramo alto	3,8 eventos/año (+19%)	4,4 eventos/año (+38%)	5,6 eventos/año (+75%)
Frecuencia de heladas anómalas (fuera del período histórico normal)	1,8 eventos/año en páramo alto	2,2 eventos/año (+22%)	2,6 eventos/año (+44%)	3,4 eventos/año (+89%)
THI máximo mensual — Valle interandino	64,8 (enero 2016, histórico)	66,4 (> umbral 68 en 2–4 días/año)	68,2 (> umbral 68 en 8–12 días/año)	70,6 (> umbral 68 en 20–30 días/año)
PPNA estimada (kg MS/ha/año) — Páramo alto	2.300 ± 620	2.100 (–8,7%)	1.940 (–15,7%)	1.660 (–27,8%)
PPNA estimada (kg MS/ha/año) — Ladera media	5.200 ± 890	4.980 (–4,2%)	4.720 (–9,2%)	4.280 (–17,7%)

Nota. Elaboración propia con base en datos CMIP6 (PCMDI, 2023) y ERA5 (ECMWF, 2024).

4.8.2 Las Implicaciones de las Proyecciones para el Diseño de la Adaptación

Las proyecciones de la Tabla 20 destacan dos implicaciones de política que es importante subrayar en este capítulo, antes de profundizar en ellas en el Capítulo 12.

Primera: bajo el escenario RCP 8.5, el páramo alto del corredor podría ver una disminución de la PPNA del 27,8% para el 2050 en comparación con el promedio histórico. Esto resultaría en que la productividad de biomasa de los sistemas del Tipo I caiga a niveles (alrededor de 1.660 kg MS/ha/año) por debajo del umbral de sostenibilidad para una carga animal de 1 UA/ha. Este es el mismo nivel al que operan muchas de las fincas del Tipo I en la actualidad. En términos más simples, si no se toman medidas de adaptación, el sistema extensivo de páramo del Carchi se volverá económicamente inviable para el año 2050 bajo el escenario de altas emisiones.

Segunda implicación: el THI máximo mensual en el valle interandino superará sistemáticamente el umbral de estrés calórico (68) para el 2050 bajo el RCP 8.5, algo que nunca se ha presenciado en el período histórico. Esto indica que los sistemas ganaderos más tecnificados y productivos del corredor (Tipo III y IV), que hoy están protegidos del estrés calórico gracias a la altitud, empezarán a enfrentar pérdidas en la producción debido al estrés térmico para el 2050, a menos que se implementen estrategias para mejorar el confort animal.

El momento en que el THI máximo mensual sobrepase el umbral de 68 de forma sistemática será un punto crítico. Esta superación transformará el estrés calórico en un factor limitante adicional que se sumará al impacto sobre el pastizal, afectando así la cadena causal del proyecto.

4.9 Síntesis del capítulo

- Red de datos: 10 fuentes de datos climáticos se han obtenido (ver Tabla 15). Son 6 estaciones del INAMHI, localizadas a cotas de entre 2,960 y 3,420 metros sobre el nivel del mar, con lagunas entre 0 y 15%. También se ha utilizado el reanálisis global ERA5, cuya validación es de coeficientes de determinación r^2 de 0.84 para la T y r^2 de 0.71 para PP en la región del Carchi. Se ha considerado también CHIRPS v2.0 para la precipitación diaria, r^2 de 0.81, MODIS Terra LST para la T de la superficie del suelo y GPM IMERG para precipitación de alta frecuencia; todos estos datos se han fusionado

a través de un protocolo de control de calidad de 4 pasos, logrando una estrategia de fusión de datos que cubre más del 87% del periodo 2000-2024.

- Temperatura (ver Tabla 16): Se ha determinado un gradiente de $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 metros de altitud. La temperatura varía entre $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el páramo alto y $15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el valle. Se observa una tendencia de calentamiento que es estadísticamente significativa, con un incremento de entre 0.28 y $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década, siendo más acentuada en las zonas bajas. Además, se ha registrado una disminución en la amplitud diaria de la temperatura, con un cambio de $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década ($p < 0.01$). Curiosamente, a pesar del calentamiento, han aumentado los días con heladas, con un incremento de 1.8 días por década en el páramo alto ($p < 0.05$), lo que se atribuye a una mayor irradiación nocturna durante los años de El Niño seco.
- Precipitación (ver Tabla 17): El régimen de precipitaciones de este ecosistema es bimodal, dado que está condicionado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), entre 780 y 1240 mm anuales en función de la altitud. El mayor riesgo que se extrae de este análisis radica en la interanualidad de las precipitaciones (coeficiente de variación que oscila entre el 22% y el 32 %), no en la tendencia de la serie, dado que no existen cambios significativos. En los episodios de El Niño fuerte, la precipitación disminuye de entre un 26% a un 38% en función de la zona y en puesto de La Niña fuerte, esta aumenta de entre el 32% y el 42%. Finalmente, se ha constatado la existencia de déficits hídricos severos (menos de 400 mm en cuatro meses consecutivos) en los años 2004 y 2009-, así como en 2015-2016.
- Eventos extremos (ver Tabla 18): Se han catalogado un total de 6 eventos extremos ocurridos entre los años 2004 y 2023. El impacto más severo se dio durante el evento de El Niño de 2015-2016, que resultó en una reducción del 18.4% en la producción de leche a nivel provincial, con pérdidas que oscilaron entre 3,200 y 5,400 dólares por finca. Un 23% de los ganaderos Tipo I se vieron obligados a vender su ganado, y la reducción de biomasa en este tipo alcanzó entre el 38% y el 52%. Además, se ha observado que los efectos de La Niña generan daños prolongados en el suelo, incluyendo daño mecánico y la proliferación de hongos, lo que a menudo se subestima en los análisis de impacto actuales.
- Índices climáticos (ver Tabla 19): Se han desarrollado 6 índices principales. El SPI-3, que actúa como un predictor de la disponibilidad de nitrógeno mineral, muestra que por debajo de -1.0 se activa un déficit, con un 18.4% de los trimestres clasificados en la

categoría de sequía moderada. También se ha identificado una tendencia de aumento en los extremos climáticos, con un incremento de 2.8 puntos porcentuales por década. El índice FDD, que estima el daño al pastizal por heladas, ha mostrado un incremento de 1.4 FDD por década en el páramo alto. Se ha estimado la precipitación normalizada de biomasa (PPNA), la cual actúa como un puente entre los datos climáticos históricos y la producción de biomasa, con un coeficiente de determinación provisional de 0.72. El THI mensual, que mide el estrés calórico, alcanzó un máximo histórico de 64.8 en enero de 2016, aunque se mantuvo por debajo del umbral crítico de 68. Finalmente, el ONI se considera una variable instrumental en modelos econométricos, y el IAP actúa como una variable de síntesis interanual en el Capítulo 9.

- Proyecciones climáticas (ver Tabla 20): Se han realizado proyecciones utilizando un downscaling estadístico BCSD de 12 modelos CMIP6. Para el RCP 4.5 hasta 2050, se anticipa un incremento de temperatura de entre 1.1 y 1.4 °C, con una disminución de la precipitación de entre el 5% y el 10%. La PPNA en el páramo podría disminuir hasta un 15.7%, y se espera un aumento del 38% en la frecuencia de eventos secos. El THI máximo en el valle podría alcanzar 68.2, superando el umbral durante 8 a 12 días al año. En el caso del RCP 8.5 para 2050, la temperatura podría aumentar entre 1.8 y 2.4 °C, con una reducción de la precipitación de entre el 12% y el 18%. La PPNA en el páramo podría caer hasta un 27.8%, lo que haría inviable los sistemas Tipo I sin adaptación. Además, se espera un aumento del 75% en la frecuencia de eventos secos, y el THI máximo en el valle podría alcanzar 70.6, superando el umbral durante más de 20 a 30 días al año, convirtiéndose en un nuevo factor limitante para los sistemas Tipo III y IV.

CAPÍTULO 5

Propiedades del Suelo y Diagnóstico Edáfico del Corredor Ganadero del Carchi

Diseño del muestreo edáfico, propiedades físico-químicas basales por tipo de sistema, estado nutricional del suelo, microbiología y actividad enzimática, y diagnóstico integrado de las seis limitaciones edáficas del corredor con sus implicaciones para la producción ganadera



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** el diseño del muestreo edáfico del proyecto estratificado de los cuatro tipos de sistemas ganaderos del corredor, con UPAs de centinela de seguimiento mensual y comprender la lógica en cómo ese diseño responde a las brechas de la literatura identificadas en el Capítulo 3.
- **Comparar** las propiedades físicas y químicas iniciales de los suelos del corredor en los cuatro tipos de sistemas ganaderos, ya identificando diferencias, en un sentido sistemático, ante el gradiente altitudinal, ante el contenido de materia orgánica y ante el historial de manejo.
- **Analizar** el estado nutricional del suelo en el corredor disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg y S en relación con los umbrales de suficiencia para los pastizales de altura

establecidos por el INIAP y con los requerimientos nutricionales de los bovinos de leche.

- **Interpretar** los indicadores microbiológicos del suelo biomasa microbiana, respiración basal, cociente metabólico y actividad enzimática como la interfaz entre los factores climáticos y la disponibilidad de nutrientes para el pastizal.
- **Identificar** las seis limitaciones edáficas de mayor prevalencia en el corredor — deficiencia de P, deficiencia de Mg, acidez con Al tóxico, compactación, déficit estacional de N mineral y pérdida de carbono orgánico y su magnitud de efecto sobre la producción ganadera.
- **Relacionar** el diagnóstico edáfico del corredor con la posición de los cuatro tipos de sistemas en la cadena causal del proyecto: cómo las diferencias en el estado del suelo entre tipos de sistemas amplifican o amortiguan el impacto de la variabilidad climática sobre la producción de leche.

5.1 Introducción: El Suelo como la Caja Negra de la Cadena Causal

En los capítulos previos de la Parte II, se estableció un contexto climático para el corredor ganadero del Carchi, logrando una precisión que no se había visto en la literatura actual. Se realizó una caracterización de 24 años que abarca temperatura, precipitación, eventos extremos e índices climáticos, desglosados por zonas de altitud.

Sin embargo, el clima no influye directamente en la producción de leche. Su efecto pasa primero por el suelo, y este, junto con su comunidad microbiana, los ciclos de nutrientes y su estructura física, impacta en el pastizal. El suelo es, en cierta forma, la 'caja negra' de toda la cadena causal, el componente que presenta mayor complejidad y menor visibilidad. Aquí es donde las señales climáticas se transforman en respuestas productivas.

Este capítulo se adentra en esa caja negra, presentando el diagnóstico de suelo más exhaustivo realizado hasta ahora para el corredor ganadero de altura del Carchi. Este abarca 80 unidades de producción agropecuaria (UPAs) y ofrece análisis completos sobre las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Estos análisis están organizados según los cuatro tipos de sistemas ganaderos en el corredor y se incluyen 8 UPAs centinela que han sido monitoreadas mensualmente durante 24 meses.

Es importante destacar que este diagnóstico no es un objetivo en sí mismo. Su propósito es servir como insumo para los análisis en el Capítulo 6, donde se cuantifican las relaciones entre los factores climáticos y la disponibilidad de nutrientes, así como en el Capítulo 9, que integra las dimensiones climática, edáfica, productiva y económica en la cadena causal completa.

El diagnóstico se basa en la idea de que el estado del suelo al momento de muestreo no es solo el resultado del clima, sino también de un historial de manejo: las decisiones sobre fertilización, carga animal, manejo de pasturas y uso del suelo que los ganaderos han tomado a lo largo de los años o incluso décadas. Uno de los retos metodológicos del proyecto es diferenciar el componente climático del de manejo al explicar el estado nutricional del suelo. Para abordar esto, el diseño de los modelos en el Capítulo 6 utiliza estratificación por tipo de sistema y control estadístico de variables de manejo.

5.2 Diseño del Muestreo Edáfico: Estratificación, Protocolo y UPAs Centinela

5.2.1 Principios del Diseño

El diseño del muestreo edáfico se fundamenta en tres principios clave que surgen del análisis de las brechas en la literatura del Capítulo 3.

En primer lugar, el principio de representatividad estratificada: en lugar de realizar un muestreo aleatorio simple en toda la provincia, se decidió optar por una estratificación que considera los cuatro tipos de sistemas ganaderos que se definieron en el Capítulo 1. Esto nos permite capturar la variación ecológica y productiva más significativa del corredor.

En segundo lugar, se encuentra el principio de integración de escalas temporales: el diseño combina muestreos anuales de todas las UPAs, que sirven para el diagnóstico inicial, con muestreos mensuales en las UPAs centinela. Esto es fundamental para entender la dinámica temporal de los nutrientes, tal como exige el análisis de series de tiempo.

Finalmente, el tercer principio es la coherencia metodológica con la cadena causal. En este sentido, los análisis de laboratorio no fueron elegidos simplemente por sus rangos de aplicación estándar, sino por su relevancia específica para los eslabones 3 y 4 de la cadena causal, que se relacionan con la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes.

Tabla 21.

Diseño del Muestreo Edáfico del Proyecto: Estratificación por Tipo de Sistema, Protocolo de Campo y Análisis de Laboratorio

Estrato / Sistema (Tipo)	Zona Altitudinal Representativa	N.º de UPAs Muestreadas	Puntos de Muestreo por UPA	Protocolo de Toma de Muestras y Análisis de Laboratorio
Tipo I — Extensivo de páramo	3.200–3.800 msnm; cantones Espejo, Bolívar	20 UPAs	5 sub-muestras / UPA en 3 profundidades (0–15, 15–30, 30–60 cm) → muestra compuesta por profundidad	Muestreo en cuadrícula de 10 × 10 m. Análisis completo: textura (Bouyoucos), densidad aparente (cilindro), pH (1:2 agua), MO (Walkley-Black), N total (Kjeldahl), N mineral (KCl 2M), P disponible (Bray-1 para pH < 6,5; Olsen para pH ≥ 6,5), K intercambiable (acetato de amonio), Ca, Mg, CIC, CIC efectiva, Al intercambiable. Frecuencia: estacional (4 muestreos/año en las UPAs centinela).
Tipo II — Lechero semi-tecnificado de ladera	2.800–3.200 msnm; cantones Montúfar y Tulcán	25 UPAs	5 sub-muestras / UPA en 2 profundidades (0–20, 20–40 cm)	Igual al Tipo I más: infiltración (cilindros de doble anillo), resistencia a la penetración (penetrómetro de cono), estabilidad de agregados (tamizado en húmedo). Análisis de microbiología del suelo en las UPAs centinela: biomasa microbiana (fumigación-extracción), respiración basal (respirometría), actividad enzimática (fosfatasas, ureasa, deshidrogenasas).
Tipo III — Lechero tecnificado de valle alto	2.400–2.800 msnm; cantones Tulcán y San Pedro de Huaca	20 UPAs	3 sub-muestras / UPA en 2 profundidades (0–20, 20–40 cm)	Mismo conjunto de análisis químicos que Tipo I y II. Sin análisis de microbiología del suelo en la totalidad de UPAs (solo en 5 UPAs centinela). Énfasis adicional: fraccionamiento de fósforo (método Hedley) en las UPAs con historial de

Estrato / Sistema (Tipo)	Zona Altitudinal Representativa	N.º de UPAs Muestreadas	Puntos de Muestreo por UPA	Protocolo de Toma de Muestras y Análisis de Laboratorio
				fertilización fosfatada documentado > 5 años.
Tipo IV — Empresarial intensivo de valle	2.200–2.600 msnm; cantones Tulcán y El Ángel	15 UPAs	3 sub-muestras / UPA en 2 profundidades (0–20, 20–40 cm)	Mismo conjunto de análisis que Tipo III más: análisis foliar del pasto (N, P, K, Ca, Mg, S, micronutrientes) en las muestras de biomasa del Cap. 7, para relacionar los nutrientes del suelo con la composición mineral del forraje consumido por el hato.
UPAs centinela (sub-muestra de seguimiento mensual)	2 UPAs por tipo (8 en total); distribución en gradiente altitudinal	8 UPAs (2/tipo)	Muestreo mensual de 0–15 cm + medición de T y HR del suelo con sensores datalogger (HOBO U23)	Las UPAs centinela son el núcleo del análisis de series de tiempo del proyecto: 24 meses de datos mensuales de N mineral, P disponible, K intercambiable, T del suelo, HR del suelo, sincronizados con los datos climáticos diarios del Cap. 4. La elección de las 8 UPAs centinela se hizo con criterios de accesibilidad, representatividad altitudinal y disposición documentada del propietario para el seguimiento de largo plazo.

Nota. Elaboración propia a partir de UPA: Unidad de Producción Agropecuaria.

5.2.2 Las UPAs Centinela como el Corazón Analítico del Proyecto

Las 8 UPAs centinela dos por cada tipo de sistema, dispuestas a lo largo del gradiente altitudinal del corredor, son sin duda el aspecto más crucial del diseño del muestreo. Son las únicas que ofrecen series temporales de las variables del suelo que se alinean con los datos climáticos diarios del Capítulo 4.

El diagnóstico inicial de las 80 UPAs proporciona una instantánea del estado del suelo en un momento específico. En cambio, las UPAs centinela revelan cómo ese estado se transforma

con el cambio climático y la velocidad de esas transformaciones. Es como comparar una fotografía con una película.

La elección de las 8 UPAs centinela se basó en tres criterios fundamentales. Primero, la representatividad altitudinal: estas 8 UPAs abarcan un rango de altitudes de 3,280 a 2,280 msnm, asegurando al menos una UPA por cada 250 metros de gradiente altitudinal.

Segundo, la estabilidad del acceso: se dio prioridad a las UPAs cuyos propietarios han estado involucrados en proyectos de investigación anteriores de la UPEC y han mostrado una disposición documentada para participar en un seguimiento de 24 meses. Tercero, la variabilidad del estado del suelo: se eligió dentro de cada tipo una UPA con un estado del suelo en buenas condiciones (por encima de la mediana del diagnóstico inicial en los indicadores clave) y otra con un estado degradado (debajo de la mediana), con el fin de maximizar la variación de las variables del suelo y fortalecer el poder estadístico de los modelos.

5.3 Propiedades Físicas y Químicas Basales: La Huella del Gradiente Altitudinal y el Manejo

5.3.1 Los Andisoles del Corredor: Un Perfil Edáfico Singular

En el corredor ganadero de altura del Carchi, la mayoría de los suelos son Andisoles, un tipo de suelo que proviene de materiales volcánicos y posee características ándicas. Sin embargo, hay importantes variaciones internas que dependen de la altitud y del uso que se les haya dado a lo largo del tiempo (Staß et al., 2025)

En el páramo alto, a más de 3.200 metros sobre el nivel del mar, los suelos presentan rasgos de Histosoles, que son aquellos con capas orgánicas que superan los 40 centímetros de grosor, especialmente en áreas donde la intervención humana ha sido mínima. Por otro lado, en las zonas de pastizal activo, se encuentran Andisoles húmicos que también son relevantes.

En el valle interandino, se sitúa a menos de 2.600 metros sobre el nivel del mar, los Andisoles suelen estar más desgastados por la erosión y tienen un contenido de alófano más bajo. En este caso, sus características se asemejan más a las de los Inceptisoles, especialmente en las áreas que han tenido un uso agrícola prolongado (Zehetner y Miller, 2006)

Tabla 22.

Propiedades Físicas y Químicas Basales de los Suelos del Corredor Ganadero del Carchi,

Desagregadas por Tipo de Sistema Ganadero (profundidad 0–20 cm, n=80 UPAs, período de muestreo: primer semestre 2023)

Propiedad del Suelo (profundidad 0–20 cm salvo indicación)	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Lechero semi- tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Lechero tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial intensivo (2.200– 2.600 msnm)
Textura (USDA)	Franco-arcillosa a Franco-limosa; limos 45–58%, arcillas 18–28%	Franco-arcillo-limosa; limos 40–52%, arcillas 20–30%	Franco-arcillosa; arcillas 25–35%, limos 35–48%	Franco-arcillosa a Arcillo-franca; arcillas 28–40%, limos 30–42%
Densidad aparente (g/cm³)	0,42–0,61 (media: 0,52); baja por alto contenido de materia orgánica y alófone	0,58–0,78 (media: 0,67); moderada-baja	0,72–0,95 (media: 0,84); moderada	0,85–1,10 (media: 0,96); moderada-alta; compactación incipiente en fincas con alta carga animal
Porosidad total (%)	76–84% (muy alta); microporos 42–50%, macroporos 34–38%	68–76% (alta)	58–68% (media-alta)	52–62% (media); reducción de macroporos por compactación
Contenido de materia orgánica (%) — Walkley-Black	8,4–18,6% (media: 12,8%); histosoles de páramo hasta 28%; rango más alto del corredor	5,2–10,4% (media: 7,6%)	3,8–6,4% (media: 5,0%)	2,4–4,8% (media: 3,4%); el más bajo del corredor; tendencia decreciente documentada
pH (1:2 en agua)	4,8–5,6 (media: 5,1); fuertemente ácido; alta concentración de Al intercambiable	5,2–6,0 (media: 5,6); moderadamente ácido	5,6–6,4 (media: 6,0); ligeramente ácido	5,8–6,8 (media: 6,2); ligeramente ácido a neutro; el rango más favorable para la disponibilidad de nutrientes
CIC (cmol/kg)	28–52 (media: 38); muy alta; dominada por cargas de MO y alófone	22–38 (media: 29); alta	16–26 (media: 20); media-alta	12–20 (media: 16); media
Al intercambiable (cmol/kg)	1,8–4,2 (media: 2,9); toxicidad de Al posible en	0,8–2,4 (media: 1,5); umbral de toxicidad en	0,2–1,2 (media: 0,6); bajo	< 0,4 (media: 0,2); no significativo

Propiedad del Suelo (profundidad 0–20 cm salvo indicación)	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Lechero semi- tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Lechero tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial intensivo (2.200– 2.600 msnm)
	valores > 1,5 con pH < 5,2	algunos potreros		
Profundidad efectiva del suelo (cm)	80–180+ cm; perfiles profundos con horizonte Ah bien desarrollado	60–120 cm; sin limitaciones en la mayor parte de las UPAs	50–100 cm; ocasionalmente con horizontes endurecidos a > 80 cm	40–90 cm; compactación en los primeros 30–40 cm en UPAs con manejo intensivo

Nota. Elaboración propia con base en análisis del Laboratorio de Suelos del INIAP–Santa Catalina (2023).

5.3.2 El Gradiente Materia Orgánica–Altitud y sus Consecuencias

Uno de los hallazgos más significativos en la evaluación física y química inicial es la clara presencia de un gradiente de materia orgánica (MO) relacionado con la altitud. Este gradiente es notablemente fuerte: en los sistemas del Tipo I, que corresponden al páramo alto, se tiene un promedio del 12,8% de MO, mientras que en los sistemas del Tipo IV, localizados en el valle interandino, este valor se reduce a un 3,4%. Este cambio drástico, casi de cuatro veces en el contenido de MO, es lo que explica la mayoría de las diferencias observadas entre los distintos tipos de sistemas en casi todas sus propiedades (Rosales et al., 2018).

Por ejemplo, la densidad aparente es más baja en el Tipo I debido a la menor densidad de la MO, mientras que la porosidad total es más alta en este mismo tipo. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) también se eleva en el Tipo I gracias a las cargas eléctricas que presenta la MO y el alófono. Por otro lado, el pH es más bajo en el Tipo I, resultado de una mayor producción de ácidos orgánicos durante la descomposición de la MO.

El significado del gradiente de MO para la dinámica del proyecto es claro: los suelos del páramo alto, es decir, los del Tipo I, son los que poseen el mayor potencial total de nutrientes, con altos niveles de nitrógeno total, alta CIC y alta sulfuración. Sin embargo, también son los más susceptibles a los cambios climáticos. La mineralización de esa vasta cantidad de nitrógeno orgánico es extremadamente sensible a la temperatura del suelo, la cual es la más baja y variable dentro del corredor en el páramo alto (Rosales et al., 2018).

La paradoja que enfrenta el páramo ganadero del Carchi es intrigante: aunque cuenta con el suelo más fértil en términos de reservas de nutrientes totales, también es el más inestable en cuanto a la disponibilidad de esos nutrientes para las plantas en cualquier momento específico.

"El suelo de páramo es un banco: tiene mucho depositado, pero el cajero —la comunidad microbiana— solo atiende cuando la temperatura es la adecuada."

(Testimonio de investigador de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP, entrevista 2023)

5.4 Estado Nutricional del Suelo: Disponibilidad de Nutrientes y Brechas de Suficiencia

Tabla 23.

Estado Nutricional del Suelo del Corredor Ganadero del Carchi: Disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg y S por Tipo de Sistema, con Umbrales de Suficiencia para Pastizales de Altura (INIAP, 2022)

Nutriente / Variable (0–20 cm)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Umbral de Suficiencia para Pastizales de Altura (ref. INIAP, 2022)
N total (g/kg)	8,4–22,6 (media: 14,2); el más alto del corredor por alta MO	4,8–12,4 (media: 7,8)	3,2–7,6 (media: 5,2)	2,0–5,4 (media: 3,6) Umbral: > 2,0 g/kg (suficiencia); el parámetro menos predictivo de la disponibilidad a corto plazo
N mineral disponible (NH₄⁺ + NO₃⁻, mg/kg)	18–48 (media: 28; alta estacionalidad: 8–65 a lo largo del año)	22–58 (media: 38; mayor mineralización por temperatura más alta)	28–72 (media: 48)	38–85 (media: 58) Umbral: > 20 mg/kg para crecimiento activo del pastizal; el parámetro más sensible a la temperatura y la humedad del suelo
P disponible — Bray-1 (mg/kg) [pH < 6,5]	4,2–11,8 (media: 7,4); DEFICIENTE en el 88% de las UPAs del Tipo I	6,8–18,4 (media: 11,2); DEFICIENTE en el 64% de las UPAs	12,4–28,6 (media: 19,8); MARGINAL en el 45% de las UPAs	18,2–42,4 (media: 28,6); SUFICIENTE en el 71% de las UPAs Umbral: 20 mg/kg (Bray-1) como límite inferior de suficiencia
K intercambiable (cmol/kg)	0,28–0,68 (media: 0,44);	0,32–0,74 (media: 0,52)	0,38–0,88 (media: 0,62)	0,42–0,94 (media: 0,68) Umbral: >

Nutriente / Variable (0–20 cm)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Umbral de Suficiencia para Pastizales de Altura (ref. INIAP, 2022)
	SUFICIENTE en el 72% de las UPAs pero alta lixiviación en eventos La Niña			0,20 cmol/kg (suficiencia para kikuyo); el nutriente de recuperación más rápida post-estrés climático
Ca intercambiable (cmol/kg)	2,8–8,4 (media: 5,2); adecuado en la mayoría de las UPAs pero pH bajo reduce disponibilidad efectiva	4,2–11,6 (media: 7,4)	6,4–14,8 (media: 10,2)	8,2–18,4 (media: 12,8) Umbral: > 4,0 cmol/kg (suficiencia); Ca raramente es el nutriente limitante en los Andisoles del corredor
Mg intercambiable (cmol/kg)	0,32–0,84 (media: 0,54); DEFICIENTE (< 0,50 cmol/kg) en el 48% de las UPAs del Tipo I	0,44–1,12 (media: 0,72)	0,56–1,44 (media: 0,94)	0,64–1,82 (media: 1,12) Umbral: > 0,50 cmol/kg (suficiencia); Mg es el nutriente con mayor prevalencia de deficiencia oculta en el corredor
Relación Ca:Mg	4,2–12,8 (media: 8,6); relación > 8 puede inducir deficiencia de absorción de Mg aunque el nivel de Mg sea adecuado	5,2–11,4 (media: 8,1)	6,4–10,8 (media: 8,6)	7,2–12,4 (media: 9,8) Umbral crítico: Ca:Mg > 8 con Mg < 0,6 cmol/kg → riesgo de hipomagnasemia en vacas en alta producción
S total (mg/kg)	180–420 (media: 280); adecuado pero mineralización lenta por T bajas	220–480 (media: 340)	280–520 (media: 380)	320–600 (media: 440) S raramente limitante en los Andisoles del corredor, pero puede serlo en años con T del suelo < 8 °C prolongados

Nota. Elaboración propia con base en análisis del Laboratorio de Suelos del INIAP–Santa Catalina (2023).

5.4.1 La Deficiencia de Fósforo: El Problema Nutricional Estructural del Corredor

El diagnóstico del suelo confirma lo que se anticipaba en la revisión de la literatura del Capítulo 3: la falta de fósforo disponible es el principal problema nutricional en el corredor ganadero del Carchi. De hecho, un alarmante 78% de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPAs) analizadas están por debajo del umbral de suficiencia de 20 mg/kg (Bray-1).

Sin embargo, esta deficiencia no se distribuye de manera uniforme. Afecta al 88% de las UPAs del Tipo I, al 64% del Tipo II, al 45% del Tipo III y al 29% del Tipo IV. Este patrón es predecible: la mayor prevalencia en los sistemas de mayor altitud se debe a la alta concentración de alófono en los Andisoles del páramo. Este mineral retiene el fósforo en formas que las plantas no pueden usar, con una capacidad de adsorción que puede superar los 1,500 mg de P/kg de suelo (Zehetner y Miller, 2006).

Lo que aporta este diagnóstico a la literatura es la cuantificación precisa de la magnitud de la deficiencia en el corredor del Carchi. Por ejemplo, el promedio de fósforo disponible en las UPAs del Tipo I es de solo 7.4 mg/kg, menos de un tercio del nivel considerado suficiente. Esto significa que el pastizal de páramo se enfrenta a una limitación crónica de fósforo que no se puede remediar con la mineralización natural del fósforo orgánico, dadas las temperaturas y niveles de actividad de fosfatasa documentados.

Esta limitación crónica de fósforo es el punto de partida para las recomendaciones sobre fertilización fosfatada que se presentan en el Capítulo 13, en el que se sugiere un protocolo de corrección por fases, adaptado a la alta capacidad de fijación de los Andisoles.

5.4.2 La Deficiencia de Magnesio: El Problema Oculto

La falta de magnesio (Mg) se posiciona como el segundo problema nutricional más común, afectando al 52% de las Unidades de Producción Animal (UPAs), y es, sin duda, el más pasado por alto en la gestión diaria de las granjas. A diferencia de la carencia de nitrógeno (N), que se muestra claramente en el amarillamiento del pasto, o la deficiencia de fósforo (P), que retrasa el crecimiento de las leguminosas, la deficiencia de Mg impacta en la salud de los animales de maneras sutiles, como la hipomagnesemia subclínica crónica, disminución en la ingesta de alimento y reducción en la eficiencia reproductiva.

Estas consecuencias son a menudo malinterpretadas por los ganaderos, quienes tienden a atribuir las a otros factores.

El diagnóstico de este problema revela que no solo se trata de la cantidad de Mg presente, sino también de la relación entre calcio (Ca) y magnesio (Mg). Un preocupante 38% de las UPAs de Tipo I presenta una relación Ca:Mg superior a 8, mientras que los niveles de Mg son marginales (entre 0,4 y 0,6 cmol/kg). Esta relación desequilibrada puede inhibir la absorción de Mg por el pasto, incluso cuando los niveles de Mg en el suelo son considerados suficientes desde un punto de vista técnico.

5.5 Microbiología del Suelo y Actividad Enzimática: La Interfaz Clima–Nutrientes

La microbiología del suelo, que abarca la biomasa microbiana, la respiración básica y la actividad enzimática, representa uno de los avances más significativos en el diagnóstico. Hasta ahora, ningún estudio en el corredor del Carchi había analizado estos indicadores en sistemas ganaderos situados a gran altitud.

Estos indicadores son cruciales, ya que revelan el tercer eslabón de la cadena causal: la relación entre la temperatura y la humedad del suelo y la actividad microbiana. Además, permiten medir de manera directa cuánto disminuye la mineralización del nitrógeno y el fósforo en condiciones climáticas desfavorables.

Tabla 24.
Indicadores Microbiológicos del Suelo y Actividad Enzimática en las UPAs Centinela del Corredor Ganadero del Carchi, por Tipo de Sistema (promedio anual 2023–2024; n=2 UPAs centinela por tipo)

Indicador Microbiológico	Tipo I Páramo extensivo (UPAs centinela; n=2; promedio±DE anual)	Tipo II Semi-tecnificado (UPAs centinela; n=2)	Tipo III Tecnificado (UPAs centinela; n=2)	Tipo IV Empresarial (UPAs centinela; n=2) — Referencia bibliográfica para Andisoles andinos
Biomasa microbiana del carbono (mg C/kg suelo seco)	1.840 ± 320; la más alta del corredor; consistente con el alto contenido de MO del suelo de páramo	1.240 ± 280	880 ± 210	620 ± 180 Referencia: 600–2.000 mg C/kg en Andisoles del Ecuador (Llambí et al., 2014)

Indicador Microbiológico	Tipo I Páramo extensivo (UPAs centinela; n=2; promedio±DE anual)	Tipo II Semi-tecnificado (UPAs centinela; n=2)	Tipo III Tecnificado (UPAs centinela; n=2)	Tipo IV Empresarial (UPAs centinela; n=2) — Referencia bibliográfica para Andisoles andinos
Respiración basal (mg CO₂-C/kg/día)	8,4 ± 2,1; alta actividad catabólica pero limitada por T bajas	11,2 ± 2,8; la más alta del corredor (temperatura óptima para mineralización)	9,6 ± 2,2	7,8 ± 1,8 Referencia: 5–15 mg CO ₂ -C/kg/día en suelos activos (Paul, 2015)
Cociente metabólico qCO₂ (mg CO₂-C/mg biomasa microbiana/día)	0,0046 ± 0,0009; bajo = eficiencia metabólica alta de la comunidad microbiana	0,0092 ± 0,0018; valor moderado	0,0110 ± 0,0022	0,0126 ± 0,0024 Referencia: qCO ₂ bajo (< 0,006) indica suelos con comunidades microbianas estables y bien adaptadas (Anderson, 2003)
Actividad de fosfatasa ácida (μmol PNP/g/h)	3,2 ± 0,8; moderada; limitada por T del suelo	5,4 ± 1,2; la más alta del corredor; T óptima para fosfatasas	4,8 ± 1,0	3,6 ± 0,8 La actividad de fosfatasas es el principal determinante enzimático de la mineralización del P orgánico; se reduce hasta 85% cuando T del suelo < 8 °C
Actividad de ureasa (μmol NH₄⁺/g/h)	0,82 ± 0,24; moderada; primera enzima en limitarse con T < 8 °C	1,42 ± 0,38; moderada-alta	1,28 ± 0,32	1,04 ± 0,28 La actividad de ureasa cataliza la hidrólisis de la urea a NH ₄ ⁺ ; su inhibición por frío es el mecanismo directo de reducción del N mineral disponible en años con

Indicador Microbiológico	Tipo I Páramo extensivo (UPAs centinela; n=2; promedio±DE anual)	Tipo II Semi-tecnificado (UPAs centinela; n=2)	Tipo III Tecnificado (UPAs centinela; n=2)	Tipo IV Empresarial (UPAs centinela; n=2) — Referencia bibliográfica para Andisoles andinos
				heladas prolongadas
Actividad de deshidrogenasas (µg TPF/g/día)	62 ± 18; moderada; indicador general de la actividad oxidativa de la comunidad microbiana	98 ± 22; la más alta del corredor	84 ± 20	68 ± 16 Referencia: > 40 µg TPF/g/día indica suelos con actividad microbiana activa; < 20 indica suelos deprimidos (Tabatabai, 1994)
Variación estacional del N mineral (% del valor promedio anual)	CV estacional: 58% (la más alta del corredor, por mayor amplitud térmica); rango: 8–65 mg/kg	CV estacional: 42%; rango: 14–68 mg/kg	CV estacional: 28%; rango: 24–76 mg/kg	CV estacional: 18%; rango: 32–86 mg/kg El CV estacional del N mineral es el indicador microbiológico de mayor relevancia directa para la hipótesis H1 del proyecto

Nota. Elaboración propia.

5.5.1 La Paradoja de la Alta Biomasa Microbiana en el Páramo

El indicador microbiológico más relevante para el proyecto de la alta biomasa microbiana en el páramo. Los suelos del Tipo I presentan la mayor biomasa microbiana del corredor, alcanzando los 1.840 mg C/kg. Sin embargo, esto contrasta con su respiración basal, que es la más baja en términos absolutos, con solo 8,4 mg CO₂-C/kg/día, y un cociente metabólico igualmente bajo ($qCO_2 = 0,0046$)

Esto se puede interpretar de la siguiente manera: en el suelo del páramo hay una comunidad microbiana considerable que permanece en gran parte inactiva, casi como dormida, debido a las bajas temperaturas. Solo cuando la temperatura asciende a niveles óptimos, entre 12 y 18 °C, que en el páramo se logran principalmente en los meses con mayor radiación solar, se reactiva la mineralización. Este proceso genera pulsos intensos pero breves de nitrógeno mineral.

Estos pulsos son esenciales para el pastizal, ya que representan la principal fuente de nitrógeno mineral que necesita. El proyecto se enfoca en cuantificar la magnitud de estos pulsos y su sincronización con el ciclo de crecimiento de la hierba, temas que se desarrollan en el Capítulo 6.

Por otro lado, el Tipo II ofrece un contraste interesante. Sus suelos poseen una biomasa microbiana más baja, de 1.240 mg C/kg, pero a su vez, presentan una respiración basal más alta, de 11,2 mg CO₂-C/kg/día, y una mayor actividad en las fosfatasa, alcanzando 5,4 µmol PNP/g/h. Esto se debe a que, en la zona de 2.800 a 3.200 msnm, la temperatura del suelo se encuentra con mayor frecuencia en el rango óptimo para la actividad microbiana.

El Tipo II es el sistema donde la interacción entre clima, microbiología y nutrientes resulta más favorable. Esto ayuda a explicar por qué, a menudo, los sistemas del Tipo II muestran una mayor productividad de biomasa en relación con la carga animal, a pesar de tener una menor concentración de nitrógeno total en el suelo.

5.5.2 La Variación Estacional del N Mineral como Indicador Clave

El coeficiente de variación estacional del N mineral, que mide cómo varía el N mineral disponible a lo largo del año, es un indicador microbiológico fundamental para las hipótesis del proyecto.

En el Tipo I, el CV estacional es del 58%, lo que implica una gran variabilidad (8-65 mg/kg entre el mes más frío y el más cálido). Este valor es casi tres veces mayor que el del tipo IV, que tiene un CV de 18% y un intervalo de 32-86 mg/kg.

Esta diferencia no solo indica la sensibilidad de los suelos de páramo a las condiciones climáticas, sino que también sugiere que en los sistemas de Tipo I es mucho más incierta la disponibilidad de N para el potencial pastizal.

Por ejemplo, un ganadero que trabaja con el Tipo IV puede organizar la carga animal y la suplementación con la certeza de que siempre habrá entre 30 y 85 mg/kg de N mineral disponible en el pasto.

En cambio, un ganadero del Tipo I enfrenta una situación diferente: en cualquier mes de verano fresco o durante un fenómeno de El Niño, los niveles de N mineral pueden descender a entre 8 y 12 mg/kg. Esto podría causar una caída repentina en la proteína del pasto y en el consumo voluntario de los bovinos, algo que el ganadero no podrá anticipar sin un monitoreo continuo del suelo.

5.6 Diagnóstico Integrado de Limitaciones Edáficas del Corredor

Tabla 25.

Diagnóstico Integrado de las Seis Limitaciones Edáficas de Mayor Prevalencia en el Corredor Ganadero de Altura del Carchi: Prevalencia, Sistemas Afectados, Efectos sobre la Producción y Estrategias de Corrección

Limitación Edáfica	Prevalencia en el Corredor (% de UPAs afectadas)	Sistemas Ganaderos más Afectados	Magnitud del Efecto sobre la Producción (estimación con base en literatura)	Estrategia de Corrección Propuesta (Cap. 13)
Deficiencia de P disponible (< 20 mg/kg Bray-1)	78% del total de UPAs muestreadas (88% en Tipo I; 64% en Tipo II; 45% en Tipo III; 29% en Tipo IV)	Todos los tipos, con mayor prevalencia e intensidad en los sistemas de páramo	Reducción de la PPNA estimada: 15–35% respecto al potencial productivo del suelo con P suficiente (Marschner, 2012). Reducción de la digestibilidad de la MS en 3–8 puntos porcentuales.	Fertilización fosfatada correctiva con superfosfato triple o roca fosfórica acidulada; manejo de la acidez del suelo con encalado para reducir la fijación de P por los minerales amorfos; siembra de leguminosas micorrizadas.
Deficiencia de Mg (< 0,50 cmol/kg)	52% del total (48% en Tipo I; 38% en Tipo II; 22% en Tipo III; 14% en Tipo IV)	Tipo I y II en el páramo; especialmente fincas con praderas de	Riesgo de hipomagnasemia en vacas en alta producción: pérdidas de 5–10% en producción de	Aplicación de dolomita (fuente de Ca y Mg) para corregir simultáneamente la acidez y la

Limitación Edáfica	Prevalencia en el Corredor (% de UPAs afectadas)	Sistemas Ganaderos más Afectados	Magnitud del Efecto sobre la Producción (estimación con base en literatura)	Estrategia de Corrección Propuesta (Cap. 13)
		kikuyo sin leguminosas	leche de manera subclínica crónica; episodios agudos con mortalidad posible (tetania de los pastos).	deficiencia de Mg; suplementación mineral de los bovinos con MgO cuando Mg del suelo < 0,35 cmol/kg.
Acidez del suelo (pH < 5,5) con Al intercambiable > 1,0 cmol/kg	42% del total (72% en Tipo I; 45% en Tipo II; 12% en Tipo III; 4% en Tipo IV)	Tipo I en páramo alto; especialmente en potreros con > 20 años sin encalado	Toxicidad de Al al crecimiento radicular que reduce la absorción de P y Ca; reducción de PPNA estimada: 8–18%. El kikuyo tiene tolerancia moderada al Al pero las leguminosas (trébol) son muy sensibles.	Encalado con cal dolomítica (fuente de Ca y Mg) para elevar pH a 5,8–6,2; aplicación en dos fases (50% en otoño, 50% en primavera) para evitar la sobre-corrección.
Compactación del suelo (densidad aparente > 0,90 g/cm³ en 0–20 cm)	35% del total (4% en Tipo I; 18% en Tipo II; 45% en Tipo III; 62% en Tipo IV)	Tipo III y IV con alta carga animal y pastoreo en suelo húmedo; sistemas de vale	Reducción de la infiltración del agua y la exploración radicular; mayor escorrentía superficial y erosión; reducción de PPNA estimada: 10–20%; daño acumulativo al ciclo de nutrientes.	Reducción de la carga animal en períodos de alta humedad del suelo; períodos de descanso prolongados (> 45 días); subsolado selectivo en los potreros más afectados; introducción de especies de raíz profunda.
Bajo contenido de N mineral en épocas frías o secas (< 15 mg/kg)	Afecta temporalmente al 68% de las UPAs durante los meses de julio–agosto (verano) y durante los eventos El Niño	Todos los tipos pero con mayor amplitud e intensidad en el Tipo I (CV estacional 58%)	Reducción del contenido de proteína cruda del pasto de 18–22% a 8–12% durante los períodos de déficit; pérdida de producción de leche de 12–20% durante episodios	Fertilización nitrogenada de mantenimiento antes de los períodos de mayor demanda; sistemas de riego suplementario que mantengan la humedad del suelo > 40% de la

Limitación Edáfica	Prevalencia en el Corredor (% de UPAs afectadas)	Sistemas Ganaderos más Afectados	Magnitud del Efecto sobre la Producción (estimación con base en literatura)	Estrategia de Corrección Propuesta (Cap. 13)
			prolongados (> 4 semanas).	capacidad de campo para preservar la actividad microbiana.
Pérdida de carbono orgánico del suelo (tendencia decreciente)	Documentada en 28% de las UPAs con historial de intensificación > 15 años (principalmente Tipo III y IV)	Tipo III y IV con mayor carga animal histórica y mayor uso de fertilizantes de síntesis	Reducción de la CIC, de la capacidad de retención de agua y de la actividad microbiana; pérdidas de 0,3–0,8% de MO por año en suelos con intensificación sin reposición de materia orgánica.	Aplicación de compost y bokashi (mínimo 5 t/ha/año); establecimiento de pasturas mixtas gramínea-leguminosa que aumenten la entrada de C al suelo; rotaciones que incluyan períodos de descanso prolongados.

Nota. Elaboración propia.

5.6.1 La Jerarquía de Limitaciones por Tipo de Sistema

El diagnóstico integrado pone de manifiesto una jerarquía de limitaciones que cambia de manera sistemática según el tipo de sistema ganadero. En los sistemas del Tipo I, que se caracterizan por el uso extensivo del páramo, las limitaciones más significativas son la falta de fósforo (88% de las Unidades de Producción Animal), la acidez provocada por el aluminio tóxico (72%) y la escasez de magnesio (48%). Estas son limitaciones que surgen del suelo, inherentes al tipo de suelo y al bajo pH del páramo. El manejo ganadero extensivo no ha logrado corregir estas deficiencias, principalmente porque la inversión en encalado y fertilización fosfatada no se ha considerado rentable, especialmente con los bajos precios históricamente ofrecidos por la leche y el escaso acceso a crédito que enfrentan estos ganaderos.

Por otro lado, en los sistemas del Tipo III y Tipo IV, que incluyen lecherías tecnificadas y empresariales, el panorama cambia. Aquí, las limitaciones originadas en el suelo son menos severas, ya que las prácticas de fertilización y encalado han ayudado a mitigarlas.

Sin embargo, la compactación del suelo, un problema generado por la actividad humana y el sobrepastoreo en épocas de humedad se convierte en el desafío más común (45-62% de las Unidades de Producción Animal). Una compactación tan intensa reduce la infiltración del agua así como la porosidad del suelo y da lugar a la falta temporal de oxígeno, lo que a su vez inhibe la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes durante las lluvias muy intensas. En conclusión, si bien el avance de los sistemas más complejos del corredor ha evitado el problema del suelo debido al cambio de altitud, ha surgido una serie de problemas nuevos, fruto de la intensificación del uso.

5.7 El Suelo como Amplificador o Amortiguador del Impacto Climático

5.7.1 La Función Amortiguadora del Suelo de Buena Calidad

Uno de los descubrimientos más significativos del diagnóstico edáfico, especialmente en lo que respecta a su influencia en el diseño de estrategias de adaptación, es que la condición del suelo afecta de manera notable el impacto de la variabilidad climática en la producción del pastizal.

Un suelo rico en materia orgánica, con una estructura bien formada y una comunidad microbiana activa, tiene una mayor capacidad para amortiguar las perturbaciones climáticas. Este tipo de suelo puede almacenar más agua accesible para las raíces durante las épocas secas —de hecho, la materia orgánica puede retener hasta 20 veces su peso en agua—, mantener una temperatura más constante debido a su mayor capacidad de retención de calor y contar con una reserva más amplia y diversa de nutrientes mineralizables que pueden compensar en parte la disminución de la mineralización en períodos de temperaturas extremas.

Por otro lado, un suelo que presenta bajo contenido de materia orgánica, una estructura deteriorada y una comunidad microbiana debilitada, actúa como un amplificador del impacto climático. En este caso, hay una escasa reserva de agua disponible para las raíces, siendo el primero en experimentar el déficit hídrico, poca inercia térmica, lo que lo hace más vulnerable a las fluctuaciones de temperatura, y una comunidad microbiana que ya opera cerca de sus mínimos sin la presión de una perturbación climática adicional.

Particularmente en las UPAs del Tipo IV, donde la compactación del corredor es más evidente, se observa que la reducción de la infiltración provocada por esta compactación da lugar a un

déficit hídrico del suelo durante los periodos secos, incluso cuando las precipitaciones se encuentran dentro del rango histórico normal.

5.7.2 La Implicación para la Cuantificación del Impacto Climático

La función de amplificación o amortiguación del suelo tiene una clara implicación metodológica para el diseño de los modelos presentados en el Capítulo 6. Es fundamental entender que el impacto del clima en la disponibilidad de nutrientes varía según el tipo de sistema. Por ejemplo, un evento de El Niño con una magnitud específica, como un déficit de precipitación del 30%, provocará una reducción en el nitrógeno mineral disponible que será más pronunciada en las UPAs del Tipo I, que tienen un alto contenido de materia orgánica (MO) y son más sensibles a la temperatura.

En contraste, en las UPAs del Tipo IV, donde el contenido de MO es bajo, la mineralización ya se encuentra en niveles reducidos bajo condiciones normales y no tendrá mucho margen para caer aún más. Esta interacción entre el tipo de suelo y los efectos climáticos es exactamente lo que los modelos de regresión estratificados en el Capítulo 6 intentan capturar y medir. Esto es lo que diferencia a este proyecto de otros análisis sobre el impacto climático que utilizan promedios generales sin considerar las variaciones por tipo de sistema.

5.8 Comparación con los Valores de Referencia de la Literatura y con el Altiplano Nariñense

5.8.1 Contexto Andino Regional

Al comparar los datos del corredor del Carchi con los valores de referencia encontrados en la literatura andina y la información disponible del altiplano nariñense, se observa un perfil de suelo que se alinea con lo que se espera para los Andisoles de la región norte de los Andes. Se notan altos niveles de materia orgánica en las áreas de mayor altitud, una deficiencia estructural de fósforo disponible a lo largo de toda la gradiente altitudinal, y un pH que se sitúa en un rango moderadamente ácido, con un nivel variable de aluminio intercambiable.

Los valores de biomasa microbiana, que oscilan entre 1.840 y 620 mg C/kg dependiendo del tipo de sistema, son consistentes con los 600 a 2.000 mg C/kg que reportaron Llambí et al. (2014) para los Andisoles en Ecuador, Colombia y Venezuela. Por otro lado, los valores de actividad de fosfatasas, que van de 3,2 a 5,4 $\mu\text{mol PNP/g/h}$, son un poco más bajos que los que Cárdenas et al. (2017) encontraron para el altiplano cundiboyacense, donde los valores eran de

4,8 a 7,2 $\mu\text{mol PNP/g/h}$. Esto se puede atribuir a que la temperatura media del corredor del Carchi es menor en comparación con la del altiplano colombiano.

5.8.2 Lo que el Corredor del Carchi Tiene que el Altiplano Nariñense no Tiene

Una de las diferencias más destacadas entre el corredor del Carchi y el altiplano nariñense, que es la parte colombiana del corredor binacional, radica en el porcentaje de UPAs del Tipo I (páramo extensivo). En el Carchi, este porcentaje es mayor en comparación con Nariño.

El altiplano nariñense presenta una menor extensión de pastizales a altitudes superiores a los 3.200 metros sobre el nivel del mar, mientras que en el rango de 2.600 a 3.000 metros se encuentra más pastizal. Esto se debe a que las condiciones de temperatura del suelo en esta altitud son más favorables para la mineralización.

Esta variación en la distribución según la altitud sugiere que el corredor del Carchi tiene una mayor parte de su área ganadera en la zona que enfrenta una mayor vulnerabilidad climática, que es el páramo alto. Este ecosistema es muy sensible a los cambios de temperatura que afectan la mineralización. Por lo tanto, esto podría ayudar a explicar las pérdidas más significativas que ha experimentado el sector ganadero del Carchi durante los eventos de El Niño, en comparación con lo que se ha registrado en el altiplano nariñense, como se documentó en el estudio de Patiño et al. (2018).

5.9 Síntesis del capítulo:

- Diseño del muestreo (Tabla 21): Se llevaron a cabo 80 UPAs, las cuales se estratificaron en 4 tipos de sistemas ganaderos (20/25/20/15 por tipo). Se realizó un análisis exhaustivo de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo en el laboratorio acreditado ISO 17025 INIAP-Santa Catalina. Además, se establecieron 8 UPAs centinela con un muestreo mensual (2 de cada tipo) y se utilizaron sensores HOBO U23 para medir la temperatura y la humedad del suelo. Se analizaron 4 profundidades (0–15, 15–30, 30–60 cm) en las UPAs del Tipo I. Los principios del diseño incluyen la representatividad estratificada, la integración de escalas temporales y la coherencia metodológica con la cadena causal.
- Microbiología del suelo (Tabla 24): Se presenta la paradoja de la alta biomasa microbiana en el páramo, donde el Tipo I muestra la mayor biomasa (1.840 mg C/kg), pero también la menor respiración y el valor $q\text{CO}_2$ más bajo, indicando que la comunidad microbiana está dormida por el frío. Por su parte, el Tipo II tiene la mayor actividad (respiración de 11,2

mg CO₂-C/kg/día, fosfatasa 5,4 µmol PNP/g/h) gracias a la temperatura óptima en su rango altitudinal. Sin embargo, la actividad de ureasa se ve limitada por el frío, lo que reduce directamente el nitrógeno mineral durante el invierno. La variabilidad estacional del nitrógeno mineral es del 58% en el Tipo I frente al 18% en el Tipo IV, lo que genera un triple impacto en la predictibilidad de la oferta de nitrógeno para el pastizal de páramo.

- Diagnóstico integrado de limitaciones (Tabla 25): Se identificaron 6 limitaciones: fósforo deficiente (78% de las UPAs; -15/35% PPNA), magnesio deficiente (52%; hipomagnesemia subclínica -5/10% leche), acidez con aluminio tóxico (42%; -8/18% PPNA), compactación (35%; dominante en Tipo III-IV, -10/20% PPNA), déficit estacional de nitrógeno mineral (68% en verano; -12/20% leche) y pérdida de carbono orgánico (28% de UPAs con historial de intensificación; -0,3/0,8% MO/año). La jerarquía de limitaciones varía según el tipo: se presentan limitaciones pedogénicas en los Tipos I y II, mientras que en los Tipos III y IV son predominantemente antrópicas.

- El suelo como amplificador o amortiguador del impacto climático: Los suelos con alta materia orgánica actúan como amortiguadores (mayor reserva de agua, mayor inercia térmica, mayor reserva de nutrientes mineralizables). En contraste, los suelos degradados funcionan como amplificadores (menor reserva de agua, menor inercia térmica, y una comunidad microbiana deprimida). Desde una perspectiva metodológica, esto implica que el impacto climático sobre la disponibilidad de nutrientes no es uniforme entre los diferentes tipos de sistemas. Por lo tanto, los modelos presentados en el Capítulo 6 deben estratificarse por tipo para reflejar adecuadamente la interacción entre tipo de suelo y variabilidad climática.

CAPÍTULO 6

Relación entre Factores Climáticos y Dinámica de Nutrientes del Suelo

Modelos de regresión temperatura–N mineral, análisis de lixiviación de K ante eventos de lluvia intensa, series de tiempo de la señal ENSO en los nutrientes, cuantificación integrada del efecto de cada fase del ENSO sobre N, P y K, y los cuatro modelos estadísticos que operacionalizan los eslabones 1–4 de la cadena causal



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Cuantificar** la relación entre la temperatura del suelo y la disponibilidad de N mineral en los cuatro tipos de sistemas ganaderos del corredor del Carchi.
- **Analizar** la respuesta de la disponibilidad de nutrientes del suelo ante eventos climáticos extremos en los diferentes tipos de sistemas ganaderos del corredor de altura de Carchi.
- **Interpretar** los resultados del análisis de series de tiempo de las variables del suelo en las UPAs centinela: componentes estacionales, de tendencia e irregulares, y la señal del ENSO en los nutrientes con sus rezagos óptimos.

- **Describir** los efectos cuantificados de las cuatro fases del ENSO sobre la disponibilidad de N mineral, P disponible y K intercambiable en cada tipo de sistema del corredor, incluyendo los mecanismos dominantes de transmisión.
- **Evaluar** los cuatro modelos estadísticos contruidos para operacionalizar los eslabones 1–4 de la cadena causal, incluyendo el SEM parcial en términos de su ajuste, sus coeficientes y sus limitaciones, y su articulación con el SEM completo del Capítulo 9.
- **Analizar** el efecto de la variabilidad climática acerca de la dinámica y disponibilidad de los nutrientes del suelo en las varias clases de sistemas ganaderos del corredor de altura de Carchi.

6.1 Introducción: De la Correlación a la Cuantificación Causal

El Capítulo 5 trataba del estado en el que se encuentra el suelo en el corredor, haciendo énfasis en conocer de qué manera el estado físico, químico y microbiológico del suelo influirá en su capacidad de producción y su sensibilidad frente a los cambios climáticos. En este capítulo se da un paso hacia un aspecto importante del proyecto: relacionar y cuantificar la variabilidad de las variables climáticas (temperatura del suelo, humedad del suelo, fenómeno ENSO) y la dinámica de los nutrientes del suelo (nitrógeno mineral, fósforo disponible y potasio intercambiable), importantes para el crecimiento del pastizal y de los animales de ganado.

Es necesario distinguir entre correlación y causalidad en este caso. Por ejemplo, se observa como el nitrógeno mineral tiende a decrecer con la llegada del verano (julio y agosto), coincidiendo con una baja de la temperatura del suelo y con una baja en la lluvia. La correlación simplemente nos dice que tiende a bajar el nitrógeno. Pero la correlación no nos dice cuánto de la variabilidad del nitrógeno se explica por la temperatura, cuántos por la humedad del suelo, o cuánto de ese cambio es provocado por el clima o por los tratamientos de manejo ganadero. (Hernan y Robins , 2020)

Para abordar esta complejidad, utilizamos modelos de regresión múltiple con efectos fijos relacionados con el manejo, además de llevar a cabo un análisis de ecuaciones estructurales. Estas herramientas nos permiten descomponer la varianza de manera rigurosa y obtener los coeficientes cuantitativos necesarios para los modelos que se desarrollarán en los Capítulos 7 a 12.

Los datos provenientes de las 8 UPAs centinela, verificadas mensualmente durante un intervalo de 24 meses, constituyeron la información empírica, con 192 observaciones por cada tipo de

sistema; el periodo de seguimiento incluyó una diversidad de situaciones climáticas, llegando a incluir una fase de La Niña y una fase de transición hacia condiciones asociados con El niño que hicieron posible el análisis de la respuesta de los nutrientes frente a la variabilidad climática; los sensores HOBO, dispuestos a 10 cm de profundidad, registraron temperatura y humedad del suelo cada 30 min., lo que facilitó la recogida de las variables ambientales y sus respectivos rezagos; la clasificación de las UPAs en 4 tipos de sistemas permitieron comparar la respuesta de los nutrientes en diferentes sistemas productivos y climáticos.

6.2 Temperatura del Suelo y Disponibilidad de Nitrógeno Mineral: Los Modelos de Regresión

6.2.1 El Modelo Central y sus Supuestos

El enfoque principal de este capítulo se centra en la regresión lineal mixta que relaciona la disponibilidad de N mineral con la temperatura del suelo y la humedad del suelo durante los 7 días previos a la recolección de muestras. Este modelo concentra efectos fijos de las variables de manejo y un efecto aleatorio establecido en la Unidad de Producción Agrícola (UPA).

La disposición de considerar un rezago de 7 días para las variables climáticas se fundamenta en un análisis de la función de correlación cruzada (FCC) entre las series de temperatura del suelo (T_{suelo}) y N mineral. Se ha encontrado que la correlación alcanza su punto máximo con un rezago de entre 5 y 9 días, siendo 7 días la media. Esto es coherente con los tiempos de respuesta observados en la comunidad microbiana del suelo ante cambios de temperatura, tal como han documentado Paul (2015).

Tabla 26.

Modelos de Regresión Lineal Mixta para la Disponibilidad de N Mineral en Función de la Temperatura y la Humedad del Suelo, por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (n = 192 observaciones por tipo; período 2023–2024)

Parámetro del Modelo	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Notas metodológicas
Ecuación del modelo ajustado	$N_{\text{min}} = -41,8 + 4,92 \times T_{\text{suelo}} + 0,38 \times HR_{\text{suelo}}$	$N_{\text{min}} = -28,4 + 3,61 \times T_{\text{suelo}} + 0,29 \times HR_{\text{suelo}}$	$N_{\text{min}} = -18,2 + 2,84 \times T_{\text{suelo}} + 0,22 \times HR_{\text{suelo}}$	$N_{\text{min}} = -12,6 + 2,18 \times T_{\text{suelo}} + 0,16 \times HR_{\text{suelo}}$ T_{suelo} : temperatura media del suelo (°C) en los 7 días previos al muestreo; HR_{suelo} : humedad volumétrica del suelo (%) en los 7

Parámetro del Modelo	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Notas metodológicas
				días previos al muestreo (datos HOBO U23 de las UPAs centinela)
R² ajustado	0,74	0,68	0,62	0,57 Los R ² decrecen con la altitud porque en las zonas más bajas el manejo (fertilización, riego) explica una fracción mayor de la varianza del N mineral, reduciendo la proporción explicada por el clima
Coeficiente de T_suelo (β_1) e intervalo de confianza 95%	$\beta_1 = 4,92$ (IC 95%: 3,84–6,00); $p < 0,001$	$\beta_1 = 3,61$ (IC 95%: 2,72–4,50); $p < 0,001$	$\beta_1 = 2,84$ (IC 95%: 2,04–3,64); $p < 0,001$	$\beta_1 = 2,18$ (IC 95%: 1,42–2,94); $p < 0,001$ El gradiente del coeficiente β_1 con la altitud (4,92 $\rightarrow$ 2,18) es coherente con el gradiente de sensibilidad térmica documentado por Llambí et al. (2014) para los Andes tropicales
Q10 calculado (cociente de temperatura de la mineralización)	Q10 = 2,28 (IC 95%: 2,04–2,52)	Q10 = 2,14 (IC 95%: 1,96–2,32)	Q10 = 2,06 (IC 95%: 1,88–2,24)	Q10 = 1,98 (IC 95%: 1,82–2,14) Todos dentro del rango 2,0–2,5 reportado por la literatura para Andisoles andinos; el Q10 del Tipo I es el más alto del corredor, confirmando la H1 del proyecto
Umbral inferior de T_suelo para mineralización activa (T_min, °C)	8,5 °C (IC 95%: 7,8–9,2); por debajo de este umbral el N mineral cae a < 10 mg/kg en < 10 días	8,0 °C (IC 95%: 7,4–8,6)	7,4 °C (IC 95%: 6,8–8,0)	6,8 °C (IC 95%: 6,2–7,4) El umbral inferior más alto del Tipo I (8,5 °C) refleja la mayor especialización de su comunidad microbiana en las temperaturas del páramo: más sensible

Parámetro del Modelo	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Notas metodológicas
				al frío pero también más activa cuando la temperatura es óptima
Efectos fijos de manejo incluidos en el modelo	Carga animal (UA/ha), años sin fertilizar, % leguminosas en el pastizal	Carga animal (UA/ha), dosis de N aplicada (kg/ha/año), % leguminosas	Carga animal (UA/ha), dosis de N y P aplicados, número de riegos/año	Dosis de N y P aplicados (kg/ha/año), número de riegos/año, tipo de fertilizante Los efectos de manejo se controlan como efectos fijos en el modelo lineal mixto para aislar el efecto climático sobre el N mineral
Residuos del modelo (diagnóstico)	Homocedasticidad: sí (test de Breusch-Pagan, $p = 0,18$). Normalidad: sí (Shapiro-Wilk, $p = 0,12$). Autocorrelación: leve positiva (DW = 1,62; corregida con rezago AR1)	DW = 1,71; $p(\text{BP}) = 0,24$; $p(\text{SW}) = 0,18$	DW = 1,78; $p(\text{BP}) = 0,31$; $p(\text{SW}) = 0,22$	DW = 1,84; $p(\text{BP}) = 0,35$; $p(\text{SW}) = 0,28$ La autocorrelación leve en los residuos refleja la dependencia temporal de los datos de series mensuales; corregida con estructura AR1 en el modelo

Nota. Elaboración propia con base en datos de las UPAs centinela del proyecto (UPEC, 2023–2024).

6.2.2 El Gradiente del Coeficiente β_1 como Confirmación de la Hipótesis H1

El hallazgo más notable en la Tabla 6.1 es el descenso del coeficiente β_1 a medida que aumenta la altitud: pasa de 4,92 en el Tipo I a 2,18 en el Tipo IV. Este descenso indica que el nitrógeno mineral en los suelos de páramo reacciona casi el doble de intensamente a las variaciones de temperatura del suelo en comparación con los suelos del valle interandino.

La interpretación de este fenómeno es bastante clara: los suelos de páramo del Tipo I albergan la mayor cantidad de biomasa microbiana en el corredor, alcanzando los 1.840 mg C/kg. Sin embargo, esta comunidad microbiana opera casi siempre cerca de su temperatura mínima de actividad. Así, un aumento de 1 °C en la temperatura del suelo indica que su rango activo se desplaza de una forma bastante significativa, incluso más acentuada en los suelos del valle (ya que están expuestos a temperaturas más elevadas y presentan una por ende una menor capacidad de aumentar el rango de su actividad con el calor).

Este gradiente refrenda la Hipótesis H1 del trabajo: La variabilidad climática influye de manera significativa en la disponibilidad de nitrógeno mineral según tipo de los sistemas ganaderos. La vía de la figura ha mostrado un efecto más marcado en los sistemas de páramo alto (Tipo I y II) que en los sistemas del valle interandino (Tipo III y IV).

Esta refutación tiene implicaciones directas para el diseño de políticas, ya que los programas de fertilización con nitrógeno para contrarrestar la caída de nitrógeno para el mineral durante la ocurrencia de El Niño serán más intensivos y más veloces en los sistemas Tipo I que en los Tipo IV. Esto se debe a que la reducción en la disponibilidad de nitrógeno es más significativa y el tiempo de recuperación es mayor en los primeros.

6.3 Lluvia, Lixiviación y Potasio: El Nutriente más Reactivo a la Precipitación

Tabla 27.

Efectos de los Eventos de Lluvia Intensa y de los Períodos de Sequía sobre el Potasio Intercambiable y el Nitrógeno Mineral del Suelo, por Tipo de Sistema (UPAs centinela; n = 8; período 2023–2024)

Variable / Tipo de Evento Pluviométrico	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial
Reducción de K intercambiable (cmol/kg) tras un evento de lluvia intensa (PP > 40 mm/día)	–0,12 cmol/kg (–27% del valor inicial); el impacto mayor del corredor por menor CIC en condiciones de pH bajo y mayor macroporosidad del suelo de páramo	–0,09 cmol/kg (–17%)	–0,06 cmol/kg (–10%)	–0,04 cmol/kg (–6%) La diferencia entre Tipo I y IV refleja la mayor capacidad de retención catiónica de los suelos del valle (mayor CIC y mayor % de arcillas con carga permanente)
Período de recuperación del K tras el evento de lluvia intensa	18–24 días (recuperación parcial al 80% del valor pre-evento; recuperación completa: 35–45 días)	14–18 días	8–12 días	5–8 días La mayor velocidad de recuperación en el Tipo IV se debe a la mayor actividad de mineralización de la MO del suelo (más cálido) y a la mineralización de K desde los residuos de fertilizante
Reducción del N mineral (mg/kg) tras 30 días de	–38% (media: de 28 a 17 mg/kg); temperatura del	–28% (media: de 38 a 27 mg/kg)	–19% (media: de 48 a 39 mg/kg)	–12% (media: de 58 a 51 mg/kg) La reducción del N

Variable / Tipo de Evento Pluviométrico	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial
SPI-3 < -1,0 (sequía moderada)	suelo < umbral de 8,5 °C por > 12 días en eventos de sequía fría			mineral durante la sequía es mayor en el Tipo I que en el Tipo IV en términos relativos; en términos absolutos el Tipo I cae más cerca del umbral de 15 mg/kg de limitación del crecimiento
Reducción del P disponible (mg/kg Bray-1) durante el período de sequía	-1,4 mg/kg (-19% del valor inicial ya deficiente); reducción por menor actividad de fosfatasas cuando T_suelo < 8,5 °C	-1,6 mg/kg (-14%)	-2,1 mg/kg (-11%)	-2,4 mg/kg (-8%) La reducción absoluta de P es mayor en los suelos del Tipo IV (que tienen más P disponible para perder) pero la reducción relativa es mayor en los del Tipo I (que ya están por debajo del umbral de suficiencia)
Aumento del N mineral (mg/kg) durante el período de humectación post-sequía (pulso de Birch)	+18,4 mg/kg promedio (rango: +8-32); el 'efecto Birch' es la liberación repentina de N mineral cuando el suelo seco se vuelve a humedecer; mayor en los suelos ricos en MO	+12,6 mg/kg (rango: +6-22)	+ 8,4 mg/kg (rango: +4-14)	+ 5,2 mg/kg (rango: +2-9) El efecto Birch es mayor en el Tipo I por su mayor reserva de N orgánico; los pulsos de Birch tras los eventos El Niño son potencialmente aprovechables si coinciden con el período de crecimiento activo del pastizal
Relación entre PP acumulada (4 meses) y K intercambiable (correlación de Pearson r)	r = -0,62 (p < 0,001); la precipitación acumulada explica el 38% de la varianza del K intercambiable en los meses siguientes	r = -0,54 (p < 0,001)	r = -0,41 (p < 0,01)	r = -0,32 (p < 0,01) Las correlaciones negativas confirman el mecanismo de lixiviación: más lluvia acumulada → menor K intercambiable en el período siguiente, con mayor

Variable / Tipo de Evento Pluviométrico	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial
				intensidad en las zonas de mayor macroporosidad y menor CIC

Nota. Elaboración propia con base en datos de las UPAs centinela del proyecto (UPEC, 2023–2024).

6.3.1 El Efecto Birch: Un Mecanismo de Recuperación Parcial

Un hallazgo relevante y de gran importancia para la agricultura es el análisis de las series de tiempo del K y el N, que ha puesto de manifiesto el efecto Birch en los suelos del corredor del Carchi. Después de períodos de sequía intensa ($SPI-3 < -1,5$) seguidos de lluvias normales, los suelos del Tipo I muestran un aumento en el nitrógeno mineral de +18,4 mg/kg en promedio. Este valor es significativamente más alto que el que se registraba antes de la sequía y dura entre 7 y 12 días antes de regresar a su nivel base.

Este aumento en el nitrógeno es el resultado de la liberación de nitrógeno orgánico que había permanecido atrapado en los microporos del suelo durante la sequía. Cuando el suelo recupera la humedad, dicho nitrógeno se mineraliza rápidamente. La relevancia agronómica del efecto Birch presenta dos aspectos. Primero, representa un mecanismo que recompensa parcialmente la disponibilidad de nitrógeno, lo que podría ayudar a disminuir el efecto directo de las sequías sobre el pastizal.

Si las lluvias de recuperación son las que ocurren cuando el pasto está preparado para crecer, esta entrada de nitrógeno después de la sequía bien podría producir un aumento de la biomasa más rápido de lo que podría esperarse.

Sin embargo, si el suelo está desprotegido o el pastizal se encuentra en malas condiciones cuando llega la lluvia de recuperación, el nitrógeno mineralizado durante el pulso Birch puede lixiviarse sin ser absorbido por las raíces, lo que representa una pérdida neta para el sistema.

Esta interacción entre el estado del pastizal y la eficacia del aprovechamiento del efecto Birch es una de las razones por las cuales mantener la cobertura vegetal, incluso en épocas de sequía, es la estrategia de gestión del suelo que ofrece el mejor retorno económico en el corredor del Carchi.

6.4 Análisis de Series de Tiempo: La Señal del ENSO en los Nutrientes del Suelo

Tabla 28.

Análisis de Series de Tiempo de las Variables del Suelo y del Clima en las UPAs Centinela del Corredor del Carchi: Componentes, Correlaciones con el ENSO y Rezagos Óptimos (período 2023–2024, n = 8 UPAs, 24 meses)

Variable del Suelo (UPAs centinela, n=8, 24 meses)	Análisis de Series de Tiempo: Componentes Identificados	Coefficiente de Correlación con el ONI (rezago óptimo)	Interpretación Mecanística y Relevancia para los Modelos del Cap. 9
N mineral disponible (NH₄⁺ + NO₃⁻, mg/kg)	Componente estacional: variación anual con máximo en oct–nov y mínimo en jul–ago (amplitud: 28 mg/kg promedio del corredor). Componente de tendencia: no significativa en el período de estudio (24 meses). Componente irregular: dominado por los eventos climáticos extremos (La Niña 2022–2023 y transición a fase neutra 2024).	r = –0,58 con ONI en rezago 2 meses (p < 0,001) para el Tipo I; r = –0,48 para el Tipo II; r = –0,39 para el Tipo III; r = –0,31 para el Tipo IV. El signo negativo indica que un ONI positivo (El Niño) se asocia con menor N mineral 2 meses después, a través de la reducción de la temperatura y la humedad del suelo.	El rezago de 2 meses entre el índice ONI y el N mineral disponible es el tiempo que tarda la señal climática en traducirse en cambio de actividad microbiana y luego en cambio de N mineral. Es un parámetro fundamental para el modelo SEM del Cap. 9: la variable climática ONI no actúa contemporáneamente sino con 2 meses de adelanto sobre la variable del suelo.
P disponible Bray-1 (mg/kg)	Componente estacional: variación anual de menor amplitud que el N (amplitud: 3,8 mg/kg promedio). Máximo en feb–mar (coincide con mayor actividad de fosfatasa en la estación cálida-húmeda). Mínimo en jul–ago. Pulsos irregulares de disponibilidad de P en los períodos post-lluvia intensa (posiblemente asociados a reducción de Fe ³⁺ a Fe ²⁺ con liberación de P).	r = –0,42 con ONI en rezago 3 meses (p < 0,01) para el Tipo I; r = –0,31 para el Tipo II; correlaciones no significativas para los Tipo III y IV (manejo de fertilización fosfatada confunde la señal climática en estos tipos).	El rezago de 3 meses (mayor que para el N) refleja la menor velocidad de respuesta del ciclo del P a las perturbaciones climáticas: la inmovilización y movilización del P en los minerales amorfos es más lenta que la mineralización del N orgánico. El P tiene relevancia secundaria en el modelo SEM del Cap. 9 (el N es la variable mediadora principal).

Variable del Suelo (UPAs centinela, n=8, 24 meses)	Análisis de Series de Tiempo: Componentes Identificados	Coefficiente de Correlación con el ONI (rezago óptimo)	Interpretación Mecanística y Relevancia para los Modelos del Cap. 9
K intercambiable (cmol/kg)	Componente estacional: variación clara con mínimos en los meses de mayor precipitación (feb–abr y oct–nov) por lixiviación. Amplitud estacional: 0,14 cmol/kg promedio del corredor. Componente irregular: picos negativos coincidentes con los eventos de lluvia intensa > 40 mm/días documentados en el Cap. 4.	$r = -0,51$ con el IAP acumulado de 3 meses ($p < 0,001$) para el Tipo I; $r = -0,43$ para el Tipo II; $r = -0,34$ para el Tipo III; $r = -0,26$ para el Tipo IV. El IAP (no el ONI) es el mejor predictor climático del K porque el K responde a la lluvia acumulada, no a la temperatura.	La correlación negativa K–IAP con rezago mínimo (< 1 mes) indica que el K responde casi inmediatamente a los eventos de lluvia intensa, a diferencia del N (rezago 2 meses) y del P (rezago 3 meses). Esta diferencia de rezagos es estructuralmente importante para el modelo SEM: los tres nutrientes deben incluirse con rezagos distintos.
Temperatura del suelo (°C, sensor HOBO a 10 cm)	Componente estacional: amplitud de 4,8 °C entre el mes más cálido (oct–nov) y el más frío (jul–ago) en el Tipo I; amplitud de 3,2 °C en el Tipo IV. Componente de tendencia: aumento de +0,24 °C en los 24 meses de monitoreo (no significativo estadísticamente en el período corto). Componente diario: amplitud de 6–8 °C entre el mínimo nocturno y el máximo diurno en el Tipo I.	$r = +0,84$ con la temperatura del aire (rezago 1 día): la temperatura del suelo sigue con 1 día de retraso a la temperatura del aire, amortiguada por la cobertura vegetal y el contenido de humedad del suelo. La amplitud diurna del suelo es un 42% menor que la del aire en las UPAs con buena cobertura vegetal.	La temperatura del suelo es la variable de mayor poder predictivo del N mineral disponible ($\beta_1 = 2,18\text{--}4,92$ según el tipo; R^2 parcial > 0,55 en todos los modelos). Es el eslabón 1–3 de la cadena causal operando en tiempo real: la temperatura del suelo transforma la señal climática (temperatura del aire) en actividad microbiana.
Humedad volumétrica del suelo (% , sensor HOBO a 10 cm)	Componente estacional: mínimos en jul–ago (valor medio en Tipo I: 32% CC) y máximos en feb–abr (68% CC). Componente irregular: picos de humedad > 85% CC durante eventos de lluvia intensa	$r = +0,46$ con la precipitación acumulada de 7 días ($p < 0,001$). La humedad del suelo alcanza el 40% CC (umbral mínimo para mineralización activa) con una precipitación semanal de 22–28 mm en el	La humedad del suelo actúa como un interruptor: por debajo del 40% CC la mineralización del N se reduce > 60%; por encima del 85% CC (anaerobiosis) se inhibe la nitrificación y aumenta la desnitrificación, con pérdida de N como N_2O . El rango óptimo (40–80% CC) para la mineralización

Variable del Suelo (UPAs centinela, n=8, 24 meses)	Análisis de Series de Tiempo: Componentes Identificados	Coefficiente de Correlación con el ONI (rezago óptimo)	Interpretación Mecanística y Relevancia para los Modelos del Cap. 9
	(potencialmente anaeróbico, inhibiendo la nitrificación). Mínimos extremos < 25% CC durante los eventos de sequía (El Niño 2015–2016 alcanzó 18% CC en el páramo alto).	Tipo I; de 18–22 mm en el Tipo II.	activa ocurre en el 62% de los días del período de monitoreo en el Tipo I (versus el 78% en el Tipo IV).

Nota. Elaboración propia.

6.4.1 El Rezago Diferencial como Indicador de la Velocidad de Respuesta del Ciclo de cada Nutriente

El análisis de series de tiempo revela un hallazgo significativo: las diferencias en los plazos de respuesta óptimos de los tres nutrientes principales. Para el nitrógeno mineral, el rezago es de 2 meses, lo que significa que responde al ONI dos meses más tarde. En el caso del fósforo disponible, el retraso es de 3 meses, indicando que su respuesta se da 3 meses después. Por otro lado, el potasio intercambiable responde en menos de un mes, reaccionando casi de inmediato a la lluvia acumulada.

Esta variación en los tiempos de respuesta pone de manifiesto los distintos mecanismos biogeoquímicos en juego. Por ejemplo, el potasio es un catión que se mueve fácilmente en solución, respondiendo a la precipitación a través del proceso fisicoquímico de la lixiviación. Cuando llueve, el agua arrastra el K^+ de los sitios de intercambio hacia las capas más profundas del suelo, y este efecto se siente de manera casi instantánea.

El nitrógeno mineral, por su parte, reacciona al clima a través de la mineralización biológica. Los cambios en la temperatura o la humedad del suelo alteran primero la actividad de los microorganismos, lo que puede tomar algunos días, y luego se traduce en la disponibilidad de nitrógeno mineral, que es el resultado de semanas de actividad microbiana acumulada. Por eso, el rezago de 2 meses es un reflejo de este proceso en dos fases.

El fósforo, en cambio, presenta una respuesta más lenta, ya que está ligado al mecanismo fisicoquímico de adsorción-desorción en los minerales amorfos del suelo. Este proceso es más lento que la mineralización microbiana o la lixiviación iónica.

Comprender esta jerarquía de rezagos es fundamental, ya que tiene implicaciones prácticas. Los análisis que emplean índices climáticos actuales (sin considerar el rezago) para predecir los nutrientes del suelo tienden a ser incorrectos y a subestimar los coeficientes de impacto. Los modelos presentados en el Capítulo 9 integran los rezagos óptimos aquí identificados como parte del diseño estructural del SEM.

6.5 Cuantificación Integrada del Impacto del ENSO sobre los Nutrientes del Suelo

Tabla 29.

Impacto Cuantificado de las Cuatro Fases del ENSO sobre la Disponibilidad de N Mineral, P Disponible y K Intercambiable del Suelo, por Tipo de Sistema del Corredor Ganadero del Carchi

Fase del ENSO y Duración del Episodio	Cambio en N mineral disponible (mg/kg) respecto al año de fase neutra	Cambio en P disponible Bray-1 (mg/kg)	Cambio en K intercambiable (cmol/kg)	Mecanismo Dominante y Efecto sobre la Producción de Biomasa (estimación preliminar Cap. 7)
El Niño moderado (ONI: 0,5–1,4 °C) — Episodio de 5 meses	N mineral: –18% (media corredor); –28% en Tipo I; –12% en Tipo IV. Temperatura del suelo < umbral de mineralización durante el 35% de los días del episodio en el Tipo I.	P disponible: –8% (media corredor); reducción de actividad de fosfatasas por T suelo < 8,5 °C en el 35% de los días en Tipo I.	K intercambiable: –6% (media corredor); efecto lixiviación reducido porque la precipitación también baja. K relativamente estable.	Mecanismo dominante: inhibición térmica de la mineralización (T suelo baja). Efecto sobre biomasa: –12% a –18% en Tipo I; –5% a –8% en Tipo IV. Período de recuperación: 3–5 semanas tras el retorno a fase neutra.
El Niño fuerte (ONI: > 1,5 °C) — Episodio de 8 meses	N mineral: –42% (media corredor); –58% en Tipo I (cae de 28 a 12 mg/kg, cruzando el umbral de 15 mg/kg de limitación severa del crecimiento);	P disponible: –16% en Tipo I (cae de 7,4 a 6,2 mg/kg); –8% en Tipo IV. Inhibición severa de fosfatasas por temperatura del suelo < 8,5 °C durante el 52% de los días del	K intercambiable: –4% (media corredor); la reducción de precipitación durante El Niño reduce la lixiviación, amortiguando parcialmente el	Mecanismo dominante: colapso de la mineralización del N por temperatura del suelo persistentemente por debajo del umbral de 8,5 °C. Efecto sobre biomasa: –32% a –48% en Tipo I; –14% a –20% en Tipo IV.

Fase del ENSO y Duración del Episodio	Cambio en N mineral disponible (mg/kg) respecto al año de fase neutra	Cambio en P disponible Bray-1 (mg/kg)	Cambio en K intercambiable (cmol/kg)	Mecanismo Dominante y Efecto sobre la Producción de Biomasa (estimación preliminar Cap. 7)
	–22% en Tipo IV.	episodio en el Tipo I.	efecto térmico sobre el K.	Heladas anómalas exacerban el impacto en el Tipo I.
La Niña moderada (ONI: –0,5 a –1,4 °C) — Episodio de 6 meses	N mineral: –12% (media corredor); reducción por exceso de humedad que produce condiciones de anaerobiosis temporal (> 85% CC durante > 30% de los días del episodio en el Tipo I).	P disponible: +6% (media corredor, efecto paradójico); aumento por liberación de P adsorbido en condiciones de reducción de Fe ³⁺ a Fe ²⁺ durante el encharcamiento. Pero el P liberado se reabsorbe rápidamente al re-oxigenarse el suelo.	K intercambiable: –14% (media corredor); la mayor precipitación intensifica la lixiviación; el K es el nutriente más afectado durante La Niña (en contraste con el N que es más afectado durante El Niño).	Mecanismo dominante: lixiviación de K (pérdida por agua) y anaerobiosis parcial (inhibición de nitrificación). Efecto sobre biomasa: cantidad de biomasa +8% (más agua), calidad –18% (menor proteína cruda y menor digestibilidad). El efecto paradójico sobre la producción de leche se detalla en el Cap. 8.
La Niña fuerte (ONI: < –1,5 °C) — Episodio de 10 meses	N mineral: –22% (media corredor); condiciones de anaerobiosis persistente (suelo > 85% CC durante > 50% de los días) que inhiben la nitrificación y favorecen la desnitrificación (pérdida de N como N ₂ O y N ₂); en el Tipo I el N mineral puede caer a 5–8 mg/kg durante el episodio.	P disponible: +10% (efecto paradójico pronunciado); pero la disponibilidad es altamente variable y difícilmente aprovechable por las raíces en suelo encharcado. K intercambiable: –24% en el Tipo I; pérdida severa por lixiviación; el K es el nutriente con mayor pérdida en términos relativos durante La Niña fuerte.	K intercambiable: –24% en el Tipo I (más severo de todos los episodios para el K); –12% en el Tipo IV. Daño estructural al suelo (compactación por pisoteo en suelo saturado) de efectos duraderos: la recuperación de la actividad microbiana a niveles pre-episodio tarda 8–14 meses.	Mecanismo dominante: encharcamiento → anaerobiosis → desnitrificación + lixiviación de K. Efecto sobre biomasa: paradójico en cantidad (+12% a +18%) pero severo en calidad (proteína cruda –24%). Daño acumulativo al suelo de efectos duraderos documentados en las UPAs del Tipo I.

Fase del ENSO y Duración del Episodio	Cambio en N mineral disponible (mg/kg) respecto al año de fase neutra	Cambio en P disponible Bray-1 (mg/kg)	Cambio en K intercambiable (cmol/kg)	Mecanismo Dominante y Efecto sobre la Producción de Biomasa (estimación preliminar Cap. 7)
Fase neutra del ENSO (referencia base)	N mineral: valor basal por tipo (Tipo I: 28 mg/kg; Tipo II: 38 mg/kg; Tipo III: 48 mg/kg; Tipo IV: 58 mg/kg). Variación estacional normal: CV de 28–58% según el tipo.	P disponible: valor basal por tipo (Tipo I: 7,4; Tipo II: 11,2; Tipo III: 19,8; Tipo IV: 28,6 mg/kg). Sin perturbaciones climáticas extremas.	K intercambiable: valor basal por tipo (Tipo I: 0,44; Tipo II: 0,52; Tipo III: 0,62; Tipo IV: 0,68 cmol/kg). Variación estacional de ± 14 –18% por lixiviación normal.	Referencia para cuantificar el impacto de los episodios ENSO: todas las reducciones y aumentos en las filas anteriores se calculan respecto a los valores de fase neutra de cada tipo de sistema. El año 2024 (fase de transición hacia El Niño moderado 2024–2025) es el año de referencia del proyecto.

Nota. Elaboración propia con base en datos primarios del proyecto y datos secundarios del INIAP (2023).

6.5.1 La Asimetría N-K en la Respuesta al ENSO

La Tabla 29. muestra una asimetría en cómo los nutrientes responden al ENSO: durante El Niño, el N mineral se convierte en el nutriente más afectado, con caídas de hasta el 58% en el Tipo I durante eventos fuertes. Por otro lado, el K es el más vulnerable en La Niña, experimentando una caída de hasta el 24% en el mismo Tipo I durante episodios intensos de este fenómeno.

Esta diferencia tiene sentido desde un punto de vista mecánico. El Niño provoca una disminución en la temperatura del suelo y en las precipitaciones, lo que frena la mineralización que genera N mineral, pero también reduce la lixiviación, que es lo que consume K. En cambio, La Niña incrementa las lluvias sin un aumento proporcional en la temperatura, lo que favorece la pérdida de K a través de la lixiviación, mientras que la mineralización de N se ve obstaculizada por la falta de oxígeno.

La asimetría entre N y K tiene implicaciones prácticas para la gestión del pastizal en el corredor del Carchi. Durante los eventos de El Niño, los programas de fertilización de emergencia deben

centrarse en el N, dado que es el nutriente que más disminuye. En contraste, durante La Niña, es prioritario el K, ya que es el nutriente que sufre la mayor caída.

Esta estrategia diferenciada por nutriente y por fase del ENSO resulta ser más eficaz que los programas de fertilización 'de emergencia general', que aplican un fertilizante completo sin tener en cuenta el tipo de evento climático.

"Durante El Niño, el suelo se queda sin la fuerza para mineralizar. Durante La Niña, se lava lo que tenía acumulado. Son dos tipos de pobreza distintos, y cada uno necesita una medicina diferente." (Testimonio de técnico del INIAP-Carchi, entrevista 2023).

6.6 Los Modelos Estadísticos de la Cadena Clima–Suelo

Tabla 30.

Los Cuatro Modelos Estadísticos para la Operacionalización de los Eslabones 1–4 de la Cadena Causal Clima–Nutrientes del Corredor del Carchi: Especificación, Resultados y Articulación con el Cap. 9

Modelo Estadístico	Variables Incluidas y Especificación	Resultados Principales (parámetros estimados)	Limitaciones del Modelo y Dirección para el Refinamiento en el Cap. 9
Modelo 1: Regresión lineal mixta para N mineral (separado por tipo de sistema; 24 meses × 8 UPAs centinela × 12 mediciones/año = 192 observaciones por tipo)	Variables predictoras: T_suelo (7 días previos), HR_suelo (7 días previos), ONI (2 meses antes), SPI-3 (mes actual), FDD_acumulado (mes actual). Variables de control: dosis de N aplicada, carga animal, % leguminosas. Efecto aleatorio: UPA (para controlar la heterogeneidad no observada entre fincas).	T_suelo: $\beta_1 = 2,18-4,92$ (según tipo; todos $p < 0,001$). HR_suelo: $\beta_2 = 0,16-0,38$ (todos $p < 0,01$). ONI (lag 2): $\beta_3 = -2,84-6,42$ (todos $p < 0,01$). FDD (acumulado mensual): $\beta_4 = -1,82-4,28$ (todos $p < 0,05$). R^2 ajustado: 0,57–0,74 por tipo.	La estructura AR1 de los residuos (leve autocorrelación temporal) sugiere que hay memoria del sistema suelo que los modelos de regresión estándar no capturan completamente. El modelo SEM del Cap. 9 aborda esta memoria mediante la inclusión de la variable N_mineral rezagado como predictor.
Modelo 2: Análisis de varianza de medidas repetidas	Factor intra-sujeto: fase del ENSO (El Niño / La Niña /	Efecto principal del ENSO: $F(2,14) = 28,4$, $p < 0,001$, $\eta^2p =$	El tamaño del efecto de la interacción ($\eta^2p = 0,31$) indica que el 31% de la varianza del

Modelo Estadístico	Variables Incluidas y Especificación	Resultados Principales (parámetros estimados)	Limitaciones del Modelo y Dirección para el Refinamiento en el Cap. 9
(ANOVA-MR) para comparar el impacto del ENSO sobre los nutrientes entre los cuatro tipos de sistema	Neutro). Factor entre-sujetos: tipo de sistema (I, II, III, IV). Variable respuesta: cambio porcentual en N mineral, P disponible y K intercambiable. Supuestos verificados: esfericidad (test de Mauchly), homogeneidad de varianzas (Levene), normalidad de residuos.	0,48. Efecto principal del tipo de sistema: $F(3,28) = 19,6$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,41$. Interacción ENSO $\times$ tipo: $F(6,28) = 11,8$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,31$. La interacción significativa confirma que el impacto del ENSO sobre los nutrientes del suelo es diferente entre tipos de sistema.	cambio en los nutrientes es explicado por la interacción tipo de sistema $\times$ fase ENSO, independientemente de los efectos principales. Este es el resultado estadístico que justifica metodológicamente la estratificación del análisis por tipo de sistema en todos los capítulos posteriores.
Modelo 3: Modelo de ecuaciones estructurales (SEM) parcial: clima $\rightarrow$ temperatura del suelo $\rightarrow$ actividad microbiana $\rightarrow$ N mineral (eslabones 1–4 de la cadena causal)	Variables observadas: T_aire, PP, T_suelo, HR_suelo, biomasa microbiana del C (mensual), actividad de ureasa (mensual), N mineral (mensual). Variables latentes no incluidas en este modelo parcial (se integran en el SEM completo del Cap. 9): PPNA, producción de leche, ingreso ganadero.	Coficiente estandarizado T_aire $\rightarrow$ T_suelo: 0,84 ($p < 0,001$). Coficiente T_suelo $\rightarrow$ biomasa microbiana: 0,62 ($p < 0,001$). Coficiente T_suelo $\rightarrow$ actividad de ureasa: 0,71 ($p < 0,001$). Coficiente actividad de ureasa $\rightarrow$ N mineral: 0,58 ($p < 0,001$). Ajuste del modelo: CFI = 0,96; RMSEA = 0,042 ($< 0,05$ indica buen ajuste); SRMR = 0,038.	Los índices de ajuste del SEM parcial (CFI = 0,96, RMSEA = 0,042) confirman que la estructura de la cadena causal propuesta en el Cap. 2 es estadísticamente testeada y no rechazada por los datos. El SEM del Cap. 9 extiende este modelo parcial añadiendo los eslabones 5 (biomasa), 6 (leche) y 7 (economía).
Modelo 4: Función de respuesta N_mineral al SPI-3 (relación no lineal para capturar los umbrales)	Modelo de regresión segmentada (piecewise regression) con un punto de quiebre: para SPI-3 $> -1,0$: pendiente moderada (relación cuasi-lineal). Para SPI-3 $< -1,0$: pendiente	Tipo I: pendiente SPI-3 $\geq -1,0$: $\beta = +2,4$ mg N/unidad SPI; pendiente SPI-3 $< -1,0$: $\beta = +8,6$ mg N/unidad SPI (coeficiente 3,6 $\times$ mayor). Punto de quiebre: SPI-3 = $-1,0$ (IC 95%: $-0,82$ a $-1,18$). $R^2 = 0,68$. La no linealidad es	La no linealidad de la respuesta del N mineral al SPI-3 tiene implicaciones importantes para los modelos de predicción: subestimar el impacto de las sequías severas usando modelos lineales puede llevar a una subestimación sistemática del impacto económico de los eventos El Niño fuertes, que son precisamente los de mayor

Modelo Estadístico	Variables Incluidas y Especificación	Resultados Principales (parámetros estimados)	Limitaciones del Modelo y Dirección para el Refinamiento en el Cap. 9
	pronunciada (respuesta no lineal de la mineralización al déficit hídrico severo).	estadísticamente significativa (F-test del quiebre: $p < 0,001$).	costo para los ganaderos del corredor.

Nota. Elaboración propia.

6.6.1 La No Linealidad como Hallazgo Original

Unos de los principales hallazgos del capítulo se presenta El Modelo 4 de la Tabla 30 la función de respuesta segmentada del N mineral al SPI-3 representa el hallazgo más innovador de este capítulo. Este descubrimiento desafía una suposición común en muchos estudios sobre el impacto del clima en la nutrición del suelo: la idea de que la respuesta es lineal.

Al identificar el punto de quiebre en $\text{SPI-3} = -1,0$ (IC 95%: $-0,82$ a $-1,18$) y observar una diferencia de pendiente de 3,6 veces entre los dos segmentos, queda claro que los eventos de sequía severa afectan de manera desproporcionada la disponibilidad de N. Esto indica que los modelos lineales tienden a subestimar el impacto de los años con fuertes fenómenos de El Niño.

Una de las implicaciones más directas de esta no linealidad es que el umbral de $\text{SPI-3} = -1,0$ actúa como un aviso anticipado para el sector ganadero en la región. Cuando el SPI-3 desciende a $-1,0$ (indicando sequía moderada), el sistema entra en un tramo no lineal. Aquí, cualquier unidad adicional de déficit tiene un efecto tres veces más significativo sobre el N mineral que la unidad anterior.

Por lo tanto, la recomendación operativa que surge de este hallazgo es monitorear mensualmente el SPI-3 utilizando los datos de INAMHI. Además, se sugiere activar protocolos de suplementación de nitrógeno en el momento en que el SPI-3 caiga por debajo de $-1,0$. Este enfoque se desarrollará como una herramienta política en el Capítulo 13.

6.7 La Hipótesis H1 Confirmada: Síntesis de los Resultados

Hipótesis H1 (recordatorio del Cap. 1)

La variabilidad climática interanual documentada en el corredor del Carchi en el período 2000–2024 explica más del 40% de la varianza temporal en la disponibilidad de N, P y K del suelo en los sistemas ganaderos de altura, con efectos significativamente diferentes entre los cuatro tipos de sistemas ganaderos definidos en el Capítulo 1.

La Hipótesis H1 del proyecto —ha sido confirmada y cuantificada a través de los resultados presentados en el Capítulo 6. Los modelos de regresión lineal mixta muestran que entre el 57% y el 74% de la varianza del nitrógeno mineral disponible se explica según el tipo de sistema. Dentro de esto, los factores climáticos como la temperatura del suelo, la humedad del suelo, el ONI y el SPI-3 explican entre el 45% y el 62% de esa varianza, una vez que se controlan los efectos del manejo.

El umbral del 40% que se proponía en la hipótesis se supera en todos los tipos de sistema para el nitrógeno mineral, y también en los tipos I y II para el potasio intercambiable. En el caso del fósforo disponible, el porcentaje de varianza que se atribuye al clima es más bajo, oscilando entre el 28% y el 38%. Esto es coherente con la mayor inercia del ciclo del fósforo en los Andisoles del corredor.

Además, la hipótesis que sugiere que hay efectos diferentes entre los tipos de sistemas ha sido respaldada por una interacción estadísticamente significativa entre tipo y ENSO, como se observa en el ANOVA-MR ($F = 11,8$, $p < 0,001$, $\eta^2 p = 0,31$).

6.8 Implicaciones para los Capítulos 7–9 y para la Política Agropecuaria

6.8.1 Los Coeficientes como Insumos para la Cadena Causal

Los resultados que se exponen en este capítulo constituyen la entrada para los modelos de los capítulos siguientes; en particular, los coeficientes estimados para la relación entre temperatura del suelo y nitrógeno mineral y en particular los efectos asociados a los sucesos relacionados con la variabilidad climática y el efecto de los rezagos temporales que se han podido captar en los nutrientes, irán a parar al modelo de PPNA y a los modelos de ecuaciones estructurales (SEM). De este modo, los resultados que darán a lugar a esta serie de modelos permitirán la

dinámica climática y la edáfica con el análisis de la biomasa, de la producción de leche y las variables económicas del sistema ganadero.

La forma en que transmitimos los coeficientes entre capítulos —desde el diagnóstico edáfico (Cap. 5), pasando por la relación clima–suelo (Cap. 6), hasta la producción de biomasa (Cap. 7), la producción de leche (Cap. 8), y culminando en la cadena causal integrada (Cap. 9)— representa la estructura que asegura la coherencia cuantitativa a lo largo de todo el libro. Los datos numéricos de los capítulos finales pueden ser rastreados directamente a partir de los datos primarios presentados al inicio. Por último, las estimaciones económicas del Capítulo 10 son fruto de una secuencia de modelos empíricos que se basan en datos del corredor del Carchi, evitando así cualquier extrapolación de literatura externa.

6.8.2 El Umbral SPI-3 = -1,0 como Herramienta de Alerta Temprana

La determinación del umbral de quiebre no lineal en $\text{SPI-3} = -1,0$ tiene una relevancia directa en las políticas que trasciende el ámbito académico del libro. Los datos del INAMHI, necesarios para calcular el SPI-3 mensual en el corredor del Carchi, están accesibles en tiempo real. Además, el cálculo del SPI-3 es un procedimiento estadístico común que puede llevarse a cabo fácilmente utilizando cualquier hoja de cálculo.

Esto implica que el sistema de alerta temprana para la nutrición del suelo es completamente viable. Se pueden activar protocolos de suplementación de nitrógeno en el momento en que el SPI-3 del corredor desciende por debajo de -1,0 durante dos meses consecutivos. Todo esto es posible gracias a los recursos tecnológicos e institucionales que ya están a disposición en la provincia del Carchi.

Para llevar a cabo la implementación de este sistema, se requiere lo siguiente: (1) acceso a los datos en tiempo real del INAMHI para el corredor, los cuales están disponibles a través del portal del INAMHI; (2) un técnico capacitado para calcular el SPI-3 mensual, lo cual puede lograrse con un día de formación; y (3) un protocolo de alerta que esté institucionalizado por el MAG-Carchi o el GAD Provincial. El Capítulo 13 ofrece una descripción detallada de cómo se puede llevar a cabo esta propuesta de implementación.

6.9 Síntesis del capítulo

- Modelos de regresión $T_{\text{suelo}} \rightarrow N_{\text{mineral}}$ (Tabla 6.1): se presentan ecuaciones ajustadas por tipo; los coeficientes β_1 varían de 4,92 (Tipo I) a 2,18 (Tipo IV), todos con $p < 0,001$.

El R^2 ajustado muestra una disminución de 0,74 a 0,57 con la altitud, indicando que el manejo explica más varianza en las zonas bajas. El Q10 oscila entre 2,28 (Tipo I) y 1,98 (Tipo IV), manteniéndose dentro del rango de referencia de 2,0 a 2,5. El umbral mínimo de T_{suelo} para que ocurra la mineralización activa es de 8,5 °C (Tipo I) a 6,8 °C (Tipo IV). Esto confirma la hipótesis H1: la variabilidad climática explica entre el 45% y el 62% de la varianza del N mineral, una vez controlado el manejo.

- Respecto a las series de tiempo y la señal ENSO (Tabla 6.3): se identifican componentes estacionales en N (amplitud de 28 mg/kg), P (3,8 mg/kg) y K (0,14 cmol/kg). Los rezagos óptimos con el ONI son de 2 meses para N, 3 meses para P y menos de 1 mes para K. Esto muestra una jerarquía en la velocidad de respuesta: K presenta una lixiviación física inmediata, N tiene una mineralización biológica con una inercia de 2 meses y P se ve afectada por la adsorción-desorción fisicoquímica, con una inercia de 3 meses. La temperatura del suelo sigue la del aire con un rezago de 1 día y tiene una amplitud 42% menor en UPAs con buena cobertura vegetal. El rango óptimo de humedad del suelo (40–80% CC para una mineralización activa) se presenta el 62% de los días en Tipo I, en comparación con el 78% en Tipo IV.
- Cuantificando el impacto del ENSO (Tabla 6.4): durante un evento de El Niño fuerte, se observa una reducción del –58% en el N mineral en Tipo I, que cae a 12 mg/kg, por debajo del umbral de 15 mg/kg que indica limitación severa, y un descenso promedio del 42%. En el caso de La Niña fuerte, hay una disminución del –24% en K en Tipo I, el mayor impacto de K registrado durante el período, con una reducción de N del –22% a causa de la anaerobiosis. Se destaca la asimetría entre N y K: durante El Niño, N es el nutriente más vulnerable, mientras que La Niña muestra que K es el más afectado. Esto implica que la fertilización de emergencia debe diferenciarse según el nutriente y la fase del ENSO.
- Entre los hallazgos originales más relevantes, destacan dos: (1) la no linealidad en la respuesta de N mineral en función de SPI-3, con un quiebre en –1,0, que se propone como una herramienta operativa de alerta temprana, implementable con datos en tiempo real de INAMHI, como se describe en el Capítulo 13. (2) la interacción estadísticamente significativa entre el tipo de sistema y la fase de ENSO ($\eta^2p = 0,31$), que sugiere que el impacto del ENSO sobre los nutrientes del suelo varía de manera cuantificable y robusta entre distintos tipos de sistema, lo que justifica el diseño estratificado de todos los análisis presentados en el libro.

CAPÍTULO 7

Producción de Biomasa Forrajera: Determinantes Climáticos y Edáficos

Protocolo de medición con jaulas de exclusión y RPM, PPNA por tipo de sistema y zona altitudinal, modelo recalibrado con coeficientes propios del corredor, impacto de los eventos extremos sobre la cantidad y calidad del forraje, y el vínculo cuantitativo entre la fertilidad del suelo y la calidad nutricional del pasto



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** el protocolo de medición de biomasa forrajera del proyecto —jaulas de exclusión, corte y pesaje, Rising Plate Meter y NDVI satelital— y comprender cómo la combinación de métodos responde a las necesidades de precisión, representatividad y extensión temporal del análisis.
- **Analizar** los valores de PPNA directa por tipo de sistema ganadero del corredor del Carchi, incluyendo la tasa de acumulación diaria en los períodos de máximo y mínimo crecimiento y la composición florística, así como los factores climáticos y edáficos asociados con las diferencias entre sistemas.

- **Evaluar** los parámetros del modelo recalibrado de PPNA con coeficientes propios del corredor, considerando la influencia de la temperatura media del suelo y de N mineral promedio sobre el ajuste del modelo de referencia.
- **Cuantificar** el impacto de los cinco tipos de eventos climáticos extremos acerca de la producción de biomasa y su calidad nutricional en cada uno de los cuatro tipos de sistemas ganaderos del corredor.
- **Relacionar** los indicadores de calidad nutricional del forraje: PC, FND, DIVMS y EM— con los nutrientes del suelo, identificando las relaciones entre condiciones edáficas y la calidad del pasto.
- **Explicar** la relación entre los efectos de la Niña acerca de la cantidad y calidad de biomasa forrajera y sus posibilidades consecuencias para la producción de leche.

7.1 Introducción: El Pastizal como Transformador de Señales del Suelo en Alimento para el Hato

En la Parte II del libro se sentó la base cuantitativa, que fue completada en los capítulos 4 (datos climáticos del corredor), 5 (diagnóstico del suelo) y 6 (clima y nutrientes del suelo). Por lo cual, con la información aportada a partir de la Parte III, ya estamos preparados para dar el siguiente salto en la cadena causal y ver cómo el suelo nutre al pastizal y a su vez el pastizal nutre al hato ganado.

Este capítulo se centra en el primer eslabón de la Parte III: la producción de biomasa forrajera, influenciada por los nutrientes del suelo, el clima y el tipo de sistema ganadero. El pastizal actúa como un transformador que convierte las señales del suelo como la disponibilidad de nitrógeno mineral, fósforo disponible y potasio intercambiable y las señales climáticas que incluyen temperatura, radiación solar y precipitación en kilogramos de materia seca por hectárea al año, así como en porcentajes de proteína cruda y digestibilidad.

Este transformador es un ente vivo, con su propia inercia y mecanismos de respuesta, que no se presenta como una simple función de producción, sino que lo hace realmente como un sistema complejo que tiene umbrales, que presenta asimetrías, que tiene efectos de historia, etc. El reto analítico de este capítulo será cuantificar esa transformación con la precisión suficiente para que los modelos de producción de leche, que serían todos los que el capítulo 8 tiene que abordar desde la PPNA o la calidad del forraje, la puedan utilizar como insumos.

En este apartado se presentan dos aportaciones originales de esta bibliografía sobre el corredor. Se muestran datos de PPNA directa recogidos mediante jaulas de exclusión en las 8 UPAs centinela a lo largo de un acontecimiento temporal de 24 meses de duración, estos son los primeros datos presentados con ese grado de precisión espacial y temporal en lo referente al corredor del Carchi con los que poder contrastar y recalibrar el modelo de PPNA de referencia. Por otro lado, se muestran los coeficientes de correlación entre los nutrientes del suelo y la calidad forrajera, en particular, el coeficiente que relaciona el nitrógeno mineral del suelo con la cantidad de proteína cruda del pasto; es decir, que operacionaliza el eslabón 4→5 de la cadena causal.

7.2 Protocolo de Medición de Biomasa: La Arquitectura Metodológica

7.2.1 La Estrategia de Métodos Múltiples

El protocolo de medición de biomasa del proyecto usa cuatro métodos complementarios a diferentes escalas espaciales y temporales, diseñados para que sus limitaciones individuales se compensen mutuamente. Las jaulas de exclusión proveen la medida más precisa pero la menor cobertura espacial (576 observaciones en 8 UPAs). Según Goslee, (2020) El Rising Plate Meter provee menor precisión, pero mayor cobertura (1.920 mediciones en 80 UPAs). El análisis de imágenes Sentinel-2 provee cobertura de todo el corredor, pero requiere ecuaciones de calibración. El corte y pesaje provee los datos de calidad nutricional que los otros métodos no pueden dar.

Tabla 31.

Protocolo Integrado de Medición de Biomasa Forrajera del Proyecto: Métodos, Escalas Espaciotemporales, N.º de Observaciones y Articulación con los Datos Climáticos y Edáficos

Método de Medición	Escala Espacial y Temporal	N.º de Observaciones por Tipo de Sistema	Variables Medidas Simultáneamente	Articulación con los Datos Climáticos y Edáficos del Proyecto
Jaulas de exclusión (método de jaula-control) — Método primario	Parcelas de 1 m ² × 3 réplicas por UPA centinela; muestreo mensual durante 24 meses	8 UPAs centinela × 3 réplicas × 24 meses = 576 observaciones de PPNA directa	Biomasa en jaula (kg MS/m ²), biomasa fuera de jaula (kg MS/m ²), tasa de acumulación diaria (kg MS/m ² /día), altura del pasto (cm), cobertura vegetal (%), composición florística (% kikuyo,	T_suelo y HR_suelos simultáneos (HOBO U23); N mineral del suelo del mismo muestreo mensual (Cap. 6); registro fotográfico para análisis de cobertura con ImageJ. Las jaulas de exclusión proveen

Método de Medición	Escala Espacial y Temporal	N.º de Observaciones por Tipo de Sistema	Variables Medidas Simultáneamente	Articulación con los Datos Climáticos y Edáficos del Proyecto
			festuca, trébol, malezas)	el estimado más preciso de la PPNA porque excluyen el efecto del pastoreo sobre la biomasa disponible.
Corte y pesaje (método destructivo) — Validación semestral	Parcelas de 0,25 m ² × 5 réplicas por UPA centinela; muestreo semestral (junio y diciembre)	8 UPAs × 5 réplicas × 2 muestreos × 2 años = 160 muestras de composición nutricional	Biomasa seca (g MS/m ²), proteína cruda (PC, % MS), fibra neutro detergente (FND, % MS), fibra ácido detergente (FAD, % MS), digestibilidad in vitro de la MS (DIVMS, %), energía metabolizable (EM, Mcal/kg MS)	Las muestras de corte y pesaje se procesan en el Laboratorio de Nutrición Animal del INIAP–Santa Catalina para el análisis nutricional completo. Los valores de PC y DIVMS se relacionan con los N mineral y P disponible del suelo del mismo período (eslabón 4→5 de la cadena causal).
Plate meter (Rising Plate Meter RPM) — Monitoreo de rutina en el total de UPAs	1 lectura de RPM / parcela de pastoreo / UPA / mes; todas las 80 UPAs del proyecto	80 UPAs × 12 meses × 2 años = 1.920 mediciones de altura-biomasa	Altura comprimida del pasto (cm → kg MS/ha mediante ecuación de calibración), estimado de biomasa disponible en cada pastoreo	El RPM provee una medida rápida y de bajo costo de la biomasa disponible en todas las UPAs, compensando la menor densidad de observaciones respecto a las jaulas. Se calibra con las mediciones destructivas de las UPAs centinela para obtener la ecuación de conversión altura→biomasa específica para el corredor del Carchi.
Sensores NDVI (Índice de	Resolución espacial 10 m;	~400 imágenes de cobertura	NDVI como proxy de la biomasa aérea	El NDVI satelital extiende la serie de

Método de Medición	Escala Espacial y Temporal	N.º de Observaciones por Tipo de Sistema	Variables Medidas Simultáneamente	Articulación con los Datos Climáticos y Edáficos del Proyecto
Vegetación de Diferencia Normalizada) — Imágenes satelitales Sentinel-2	revisita 5 días; período: 2018–2024 (6 años)	libre de nubes para el corredor del Carchi en el período	verde; cálculo de la anomalía de NDVI respecto al promedio histórico para detectar impactos de eventos climáticos extremos	estimados de PPNA al período 2018–2024, antes del inicio del monitoreo del proyecto, usando la ecuación de calibración NDVI–biomasa ajustada con las mediciones de jaulas. Las anomalías de NDVI durante los eventos La Niña 2022–2023 y El Niño moderado 2024 se comparan con las mediciones directas del proyecto para validar la escala temporal de los impactos.

Nota. Elaboración propia.

7.3 Productividad Primaria Neta Aérea del Corredor: Datos Directos de las Jaulas

Tabla 32.

Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), Tasa de Acumulación Diaria, Composición Florística y Calidad Nutricional del Forraje por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (datos de jaulas de exclusión, UPAs centinela, período 2023–2024)

Variable de Biomasa	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Semi-tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial (2.200–2.600 msnm)
PPNA directa — Jaulas (kg MS/ha/año; media ± DE del período de monitoreo 2023–2024)	2.180 ± 620 (rango: 1.240–3.460); alta variabilidad interanual por sensibilidad climática	4.640 ± 780 (rango: 3.280–5.820); el sistema con mejor relación T_suelo–mineralización del corredor	7.480 ± 940 (rango: 5.840–8.920); el mayor rango del corredor por mayor diversidad de manejos	9.820 ± 1.120 (rango: 7.680–11.640); la más alta del corredor; riego y fertilización nitrogenada eliminan los factores limitantes

Variable de Biomasa	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Semi-tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial (2.200–2.600 msnm)
				del clima en los meses secos
PPNA estimada histórica — Modelo recalibrado (kg MS/ha/año; promedio 2000–2024)	2.240 ± 680 (recalibración confirma: modelo de Lauenroth–Salgado-Mora $R^2 = 0,72 \rightarrow 0,79$ con coeficientes propios del corredor)	4.580 ± 820	7.320 ± 1.020	9.640 ± 1.180 R^2 promedio del modelo recalibrado: 0,79; RMSE: 318 kg MS/ha/año; el modelo provisional del Cap. 4 se mejora significativamente con los coeficientes locales
Tasa de acumulación diaria (kg MS/ha/día) — Período de máximo crecimiento (oct–nov)	6,8 ± 1,4 (el período oct–nov es el de mayor T_suelo y mayor N mineral del año en el Tipo I)	14,2 ± 2,2	22,8 ± 3,1	29,4 ± 3,8 La tasa de acumulación diaria de oct–nov es el parámetro clave para el cálculo de la carga animal óptima en el período de mayor productividad del pastizal
Tasa de acumulación diaria — Período de mínimo crecimiento (jul–ago)	1,8 ± 0,8 (el período de verano limita severamente la PPNA; en años El Niño puede caer a 0,4–0,8 kg MS/ha/día)	4,2 ± 1,2	8,4 ± 1,8	14,8 ± 2,2 El cociente oct–nov / jul–ago (indicador de estacionalidad productiva) es mayor en el Tipo I (3,8×) que en el Tipo IV (2,0×), reflejando la mayor vulnerabilidad climática estacional del páramo
Composición florística predominante (% promedio del período)	Kikuyo (Cenchrus clandestinus): 62%; Festuca (Festuca arundinacea): 18%; Trébol	Kikuyo: 58%; Festuca: 14%; Trébol blanco: 12%; Trébol rojo (Trifolium	Kikuyo: 52%; Trébol blanco: 18%; Ryegrass (Lolium perenne): 12%; Otras	Ryegrass perenne y anual: 42%; Kikuyo: 28%; Trébol blanco: 16%; Otras gramíneas

Variable de Biomasa	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Semi-tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial (2.200–2.600 msnm)
	blanco (<i>Trifolium repens</i>): 8%; Otras gramíneas y especies naturales: 12%	pratense): 8%; Otras: 8%	gramíneas mejoradas: 18%	mejoradas: 14% Mayor diversidad de especies mejoradas en Tipo III–IV reduce la dependencia de la PPNA en una sola especie
Proteína cruda del pasto (PC, % MS) — Media anual	16,8 ± 3,2% (rango estacional: 8,4–22,6%; el período de verano frío y El Niño reduce la PC por debajo del umbral de mantenimiento del bovino adulto de 7–8%)	17,4 ± 2,8% (rango: 10,2–22,4%)	18,2 ± 2,4% (rango: 12,8–22,8%)	19,6 ± 1,8% (rango: 14,4–23,2%) El menor rango estacional del Tipo IV (8,8 pp) vs. Tipo I (14,2 pp) refleja el mayor control del ambiente de producción mediante riego y fertilización
Digestibilidad in vitro de la MS (DIVMS, %) — Media anual	64,2 ± 4,8% (rango estacional: 52–74%; la digestibilidad cae significativamente durante los períodos de baja T_suelo y baja N mineral disponible)	66,8 ± 4,2%	68,4 ± 3,6%	71,2 ± 2,8% La DIVMS es la variable de calidad del forraje de mayor impacto sobre la producción de leche (junto con la PC); sus determinantes climáticos y edáficos se analizan en el Cap. 8

Nota. Elaboración propia con base en datos primarios del proyecto (UPEC, 2023–2024).

7.3.1 La Diferencia de Productividad entre Tipos: Un Factor de 4,5×

En la Tabla 7.2, se destaca un hallazgo importante sobre la productividad de biomasa en los extremos del corredor. El Tipo IV, que corresponde a un modelo empresarial intensivo del valle, genera una producción primaria neta de 9.820 kg de materia seca por hectárea al año. Esto contrasta drásticamente con el Tipo I, que es un sistema de páramo extensivo, el cual solo

alcanza los 2.180 kg de materia seca por hectárea al año. Esta diferencia tan marcada se debe a la interacción de tres gradientes distintos.

Primero, está el gradiente climático: a medida que descendemos en altitud, tanto la temperatura como la radiación solar aumentan. Luego, encontramos el gradiente edáfico, donde la disponibilidad de nutrientes tiende a incrementarse con la disminución de altitud, a pesar de que todos los tipos sufren de una crónica falta de fósforo. Por último, el gradiente de manejo juega un papel crucial; el Tipo IV utiliza técnicas como riego, fertilización y especies mejoradas que ayudan a mitigar las limitaciones impuestas por el clima y el suelo, especialmente durante los meses secos.

Las repercusiones económicas de esta diferencia en productividad son significativas. El ganadero del Tipo I solo tiene a su disposición el 22% del forraje que puede obtener un ganadero del Tipo IV por hectárea. Sin embargo, ambos deben afrontar costos fijos de operación de la finca, que incluyen infraestructura, mano de obra y servicios, los cuales no se ajustan a esta disparidad en la producción. Este desequilibrio estructural en la base forrajera del corredor contribuye a la creciente polarización económica entre los sistemas ganaderos del páramo y del valle interandino, un fenómeno que se cuantifica en el Capítulo 10.

"No es que el ganadero del páramo sea menos trabajador o inteligente. Es que el suelo y el clima le dieron una partida de base distinta. Con cuatro veces menos pasto, cuatro veces más riesgo climático y el mismo costo fijo por año, las cuentas no dan igual." (Testimonio de extensionista del MAG-Carchi, entrevista 2023).

7.3.2 La Estacionalidad de la PPNA: El Cociente de Estrés Productivo

El indicador de estacionalidad productiva, que se calcula como el cociente entre la tasa de acumulación durante el periodo de máximo crecimiento y el de mínimo crecimiento, presenta una variación de 3,8× en el Tipo I y 2,0× en el Tipo IV.

Un cociente de 3,8× indica que el Tipo I genera casi cuatro veces más biomasa por día durante los meses de octubre y noviembre en comparación con julio y agosto. Esto plantea un desafío de gestión considerable: en los meses de alta productividad, el pasto crece a un ritmo que supera la capacidad del ganado para consumirlo, mientras que en los meses de baja productividad, la cantidad de forraje disponible es insuficiente para satisfacer las necesidades del hato.

El verdadero reto para los ganaderos del Tipo I radica en ajustar la carga animal para aprovechar las abundancias y sobrevivir a las escaseces, lo que se conoce como la volatilidad forrajera. Esta dificultad es la razón principal por la que los sistemas del páramo presentan una eficiencia de conversión forrajera que suele ser inferior a la de los sistemas del valle.

7.4 Recalibración del Modelo de PPNA con Coeficientes Propios del Corredor

Tabla 33.

Comparación entre el Modelo de Referencia y el Modelo Recalibrado de PPNA con Coeficientes Propios del Corredor del Carchi: Ecuaciones, Coeficientes y Mejoras de Ajuste

Parámetro del Modelo PPNA	Modelo de Referencia (Lauenroth & Sala, 1992 ajustado por Salgado-Mora et al., 2020; Cap. 4)	Modelo Recalibrado con Datos del Corredor del Carchi (proyecto actual)	Interpretación del Cambio y Significado para la Cadena Causal
Ecuación del modelo	$PPNA_{est} = -2.840 + 3,85 \times PP_{anual} + \text{gradiente altitudinal} (-550 \text{ a } -700 \text{ kg MS} / 100 \text{ m})$	$PPNA = -1.840 + 3,42 \times PP_{anual} - 488 \times (Alt/100) + 182 \times T_{media} + 24,8 \times N_{mineral_prom} + \varepsilon$	El modelo recalibrado incluye la temperatura media del suelo y el N mineral promedio anual como predictores adicionales, capturando el efecto de la fertilidad del suelo sobre la PPNA que el modelo de referencia no incluía
R² del ajuste	0,72 (provisional, del Cap. 4)	0,79 (mejorado; $p < 0,001$ para todos los coeficientes)	La mejora de R ² de 0,72 a 0,79 confirma que la temperatura media y el N mineral del suelo explican una fracción adicional significativa (7 pp) de la varianza de la PPNA, por encima de lo que explican la precipitación y la altitud solas
Coeficiente de precipitación anual (β_{PP})	3,85 kg MS / mm / ha	3,42 kg MS / mm / ha (IC 95%: 2,88–3,96)	El coeficiente local (3,42) es ligeramente inferior al de referencia (3,85), indicando que el pastizal del Carchi responde algo menos a la precipitación que el

Parámetro del Modelo PPNA	Modelo de Referencia (Lauenroth & Sala, 1992 ajustado por Salgado-Mora et al., 2020; Cap. 4)	Modelo Recalibrado con Datos del Corredor del Carchi (proyecto actual)	Interpretación del Cambio y Significado para la Cadena Causal
			promedio andino, posiblemente por la mayor frecuencia de excesos de agua que limitan la respuesta de la biomasa a la lluvia adicional
Coeficiente altitudinal (β_{Alt})	–550 a –700 kg MS / 100 m	–488 kg MS / 100 m (IC 95%: –424 a –552)	El gradiente altitudinal local (–488) es ligeramente menor (en valor absoluto) que el de referencia, sugiriendo que otros factores (manejo, fertilidad) compensan parcialmente el efecto inhibitorio de la altitud sobre la PPNA en el corredor del Carchi
Coeficiente de temperatura media (β_T)	No incluido en el modelo de referencia	182 kg MS / °C / ha (IC 95%: 124–240); $p < 0,001$	Nuevo parámetro: cada grado adicional de temperatura media del suelo se asocia con 182 kg MS/ha/año más de PPNA, lo que implica que el calentamiento proyectado al 2050 (+1,1–1,8 °C; Cap. 4) podría aumentar la PPNA en las zonas más frías del corredor, moderando parcialmente el efecto negativo de la reducción de la precipitación
Coeficiente del N mineral promedio anual (β_N)	No incluido en el modelo de referencia	24,8 kg MS / (mg N/kg suelo) / ha (IC 95%: 18,4–31,2); $p < 0,001$	Nuevo parámetro: el vínculo cuantitativo entre el ciclo del N del suelo (Cap. 6) y la PPNA. Por cada mg/kg de aumento en el N mineral promedio anual del suelo, la PPNA aumenta en 24,8 kg MS/ha/año. Este coeficiente es el eslabón

Parámetro del Modelo PPNA	Modelo de Referencia (Lauenroth & Sala, 1992 ajustado por Salgado-Mora et al., 2020; Cap. 4)	Modelo Recalibrado con Datos del Corredor del Carchi (proyecto actual)	Interpretación del Cambio y Significado para la Cadena Causal
			4→5 de la cadena causal operacionalizado en una sola cifra.
RMSE (error cuadrático medio de predicción)	~420 kg MS/ha/año (estimado del Cap. 4 basado en la variabilidad del modelo de referencia)	318 kg MS/ha/año (validación cruzada leave-one-out sobre las UPAs centinela)	La reducción del RMSE de ~420 a 318 kg MS/ha/año implica que el modelo recalibrado tiene un error de predicción de ± 318 kg MS/ha/año (± 1 DE), correspondiente a un error porcentual del 7–14% según el tipo de sistema, aceptable para los análisis económicos del Cap. 10

Nota. Elaboración propia con base en datos primarios del proyecto (UPEC, 2023–2024).

7.4.1 Los Nuevos Coeficientes y su Significado Mecansítico

Los dos nuevos coeficientes del modelo recalibrado — $\beta_T = 182$ kg MS/°C/ha para la temperatura del suelo y $\beta_N = 24,8$ kg MS/(mg N/kg suelo) /ha para el N mineral— funcionan como un vínculo cuantitativo entre los análisis del suelo (Cap. 5–6) y la producción de biomasa que se necesita para los análisis económicos en el Cap. 10.

La interpretación de estos coeficientes es bastante clara:

- $\beta_T = 182$ kg MS/°C/ha: un incremento de un grado centígrado en la temperatura media del suelo resulta en 182 kg MS/ha/años adicionales de biomasa, siempre y cuando los demás factores permanezcan constantes.
- Esto implica que el calentamiento proyectado para 2050 (+1,1 °C bajo RCP 4.5) podría aumentar la PPNA del Tipo I en aproximadamente +200 kg MS/ha/año, lo que moderaría parcialmente el impacto negativo de la disminución de las precipitaciones sobre la PPNA proyectada en el Cap. 4. Curiosamente, este calentamiento tiene un efecto positivo en la PPNA de las zonas más frías del corredor.
- $\beta_N = 24,8$ kg MS/(mg N/kg suelo) /ha: cada 10 mg/kg de incremento anual en el N mineral promedio del suelo genera 248 kg MS/ha/año más de PPNA. Ya que los

sistemas del Tipo I que reciben fertilización nitrogenada de mantenimiento tienen un N mineral promedio anual de entre 42 y 55 mg/kg (en comparación con 18 a 28 mg/kg sin fertilización), la diferencia de N mineral entre una finca del Tipo I con fertilización y otra sin fertilización resulta en una diferencia de PPNA que oscila entre 350 y 670 kg MS/ha/año.

Este cálculo es fundamental para el análisis de rentabilidad de la fertilización nitrogenada en el Tipo I que se explora en el Cap. 10.

7.5 Impacto de los Eventos Climáticos Extremos sobre la Biomasa: Cantidad y Calidad

Tabla 34.

Impacto Cuantificado de los Cinco Tipos de Eventos Climáticos Extremos sobre la Productividad de Biomasa y la Calidad Nutricional del Forraje, por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi

Evento Climático Extremo	Reducción de PPNA en Tipo I (% y kg MS/ha/año respecto al año de fase neutra)	Reducción de PPNA en Tipo II	Reducción de PPNA en Tipo III	Reducción de PPNA en Tipo IV — Mecanismo de transmisión dominante y tiempo de recuperación
El Niño moderado (ONI 0,5–1,4; duración 5 meses; ref. 2009 y 2023–2024)	–18% (–392 kg MS/ha/año); tasa de acumulación diaria en verano cae de 1,8 a 0,8 kg/ha/día; PC del pasto cae de 16,8% a 11,4%	–12% (–556 kg MS/ha/año)	–7% (–524 kg MS/ha/año)	–4% (–386 kg MS/ha/año) Mecanismo: inhibición térmica de mineralización → reducción de N mineral → reducción de PC → reducción de digestibilidad → menor consumo voluntario del hato → menor producción de leche (ver Cap. 8). Recuperación: 6–8 semanas post-normalización climática.
El Niño fuerte (ONI > 1,5; duración 8 meses; ref. 2015–2016)	–42% (–916 kg MS/ha/año); PC del pasto cae a 7,8–9,2% (por debajo del	–28% (–1.299 kg MS/ha/año)	–16% (–1.197 kg MS/ha/año)	–8% (–771 kg MS/ha/año) Mecanismo: colapso de la mineralización del N (N mineral <

Evento Climático Extremo	Reducción de PPNA en Tipo I (% y kg MS/ha/año respecto al año de fase neutra)	Reducción de PPNA en Tipo II	Reducción de PPNA en Tipo III	Reducción de PPNA en Tipo IV — Mecanismo de transmisión dominante y tiempo de recuperación
	umbral de mantenimiento de 8% para el bovino adulto); 28% de las UPAs centinela del Tipo I registra 0 días de pastoreo activo durante el peor mes del episodio			10 mg/kg durante el 62% de los días del episodio en Tipo I) + heladas anómalas (daño foliar de 30–50% en 4 eventos) + déficit hídrico severo ($HR_{\text{suelo}} < 25\%$ CC en páramo alto). Recuperación: 14–18 semanas.
La Niña moderada (ONI –0,5 a –1,4; duración 6 meses; ref. 2022–2023)	–8% en cantidad de PPNA (–174 kg MS/ha/año), pero PC del pasto cae de 16,8% a 12,4% por anaerobiosis parcial; efecto neto sobre la producción de leche: –12% (mayor que la reducción de cantidad, ver Cap. 8)	–5% en cantidad; –9% en calidad (PC –2,8 pp)	–3% en cantidad; –6% en calidad (PC –2,2 pp)	–1% en cantidad; –4% en calidad (PC –1,6 pp) Mecanismo: exceso de humedad → anaerobiosis parcial → inhibición de nitrificación → menor N mineral → menor PC del pasto; daño mecánico por pisoteo en suelo saturado; proliferación de hongos patógenos. El efecto La Niña es paradójico: más biomasa, menor calidad.
La Niña fuerte (ONI < –1,5; duración 10 meses; ref. 2010–2012)	–16% en cantidad (–349 kg MS/ha/año); PC del pasto cae a 9,8–11,2%; daño mecánico acumulativo al pastizal que reduce la PPNA del año siguiente	–10% en cantidad; –16% en calidad en el episodio; –6% adicional en el año post-episodio	–6% en cantidad; –12% en calidad	–3% en cantidad; –8% en calidad Mecanismo: encharcamiento → anaerobiosis severa + desnitrificación + lixiviación de K + daño mecánico al suelo. El efecto multi-año (daño que

Evento Climático Extremo	Reducción de PPNA en Tipo I (% y kg MS/ha/año respecto al año de fase neutra)	Reducción de PPNA en Tipo II	Reducción de PPNA en Tipo III	Reducción de PPNA en Tipo IV — Mecanismo de transmisión dominante y tiempo de recuperación
	en un 8–12% adicional por debajo del basal (efecto multi-año)			persiste en el año siguiente) es el factor que diferencia cuantitativamente el impacto de La Niña fuerte del moderado y que los análisis de impacto de un solo año subestiman.
Helada severa fuera de estación ($T_{\min} < -3\text{ }^{\circ}\text{C}$; duración 3–5 días; ref. eventos individuales en el período)	–22% de la biomasa foliar del kikuyo en los primeros 7 días post-helada; recuperación al 80% en 3–4 semanas; recuperación completa: 6–8 semanas	–14% de biomasa foliar; recuperación al 80% en 2–3 semanas	–6% de biomasa foliar; recuperación al 80% en 1–2 semanas (pasto más protegido por mayor temperatura del suelo)	–2% de biomasa foliar (daño marginal) Mecanismo: muerte celular por congelación intracelular → pérdida de turgencia y colapso del tejido foliar → reiniciación del crecimiento desde los meristemos del suelo. El kikuyo tiene tolerancia moderada a las heladas por sus meristemos subterráneos, pero los eventos $> -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante > 3 noches consecutivas producen daño permanente que requiere resiembra.

Nota. Elaboración propia.

7.5.1 La Paradoja de la Biomasa en La Niña: Más Cantidad, Menos Calidad

La variación en el impacto de El Niño y La Niña sobre la producción ganadera revela aspectos que las estadísticas de producción de leche del ESPAC no logran reflejar completamente.

Mientras que El Niño tiende a disminuir la biomasa, lo que a su vez reduce la producción de leche de forma proporcional, La Niña, aunque puede incrementar la cantidad de forraje, perjudica la calidad de este, afectando la producción de leche más de lo que la cantidad de biomasa podría indicar

Por ejemplo, una vaca que consume 12 kg de materia seca al día de forraje con un 9,8% de proteína cruda y 1,72 Mcal de energía metabolizable por kg de materia seca, en condiciones típicas de una La Niña fuerte, produce menos leche que si estuviera ingiriendo 9 kg de materia seca al día de forraje con un 16,8% de proteína cruda y 1,98 Mcal de energía metabolizable por kg de materia seca, lo que representaría una fase neutra. Esto pone de relieve que la calidad del forraje, y no solo su cantidad, juega un papel crucial en la producción de leche, un aspecto que los análisis que solo consideran la biomasa suelen pasar por alto

Además, esta paradoja tiene repercusiones en cómo se manejan los sistemas ganaderos durante La Niña. Existe la tentación de incrementar la carga animal para sacar provecho del exceso de biomasa en años húmedos, pero esto podría resultar contraproducente. El aumento del pisoteo en terrenos saturados puede causar daños mecánicos, como se documenta en los capítulos 4 y 5, lo que a su vez reduce la proporción de pasto nuevo disponible al año siguiente.

La mejor estrategia durante una La Niña moderada, tal como lo practican los ganaderos de Tipo III y IV más exitosos, es mantener la carga animal en niveles de fase neutra y reservar el excedente de biomasa como forraje diferido para los períodos secos o para el inicio de un posible El Niño.

7.6 Calidad Nutricional del Forraje y su Relación con los Nutrientes del Suelo

Tabla 35.

Calidad Nutricional del Forraje en el Corredor Ganadero del Carchi: Valores Mínimos, Promedios y Máximos, y Coeficientes de Correlación con los Nutrientes del Suelo (UPAs centinela, período 2023–2024)

Variable de Calidad del Forraje	Valor Mínimo (período julio–agosto + años El Niño)	Valor Promedio Anual (fase ENSO neutra)	Valor Máximo (período oct–nov + años La Niña moderada)	Determinante Principal del Suelo y Coeficiente de Correlación con los Nutrientes del Suelo (UPAs centinela)
Proteína cruda (PC, % MS) — Kikuyo + Festuca en Tipo I	7,8–9,2%	16,8%	21,4–23,2%	N mineral del suelo: $r = +0,78$ ($p < 0,001$). Por cada 10 mg/kg de aumento en el N mineral del suelo, la PC del pasto aumenta en 2,8 pp. Este coeficiente es el eslabón 4→5 de la cadena causal para la calidad (análogo al coeficiente de PPNA de la Tabla 7.3 para la cantidad).
Proteína cruda (PC, % MS) — Kikuyo + Ryegrass en Tipo IV	13,4–15,2%	19,6%	22,8–24,4%	N mineral del suelo: $r = +0,62$ ($p < 0,001$). El menor coeficiente en el Tipo IV vs. Tipo I refleja el mayor efecto del manejo (fertilización N) como determinante de la PC en los sistemas tecnificados, que reduce la proporción de varianza explicada por el N mineral del suelo natural.

Variable de Calidad del Forraje	Valor Mínimo (período julio–agosto + años El Niño)	Valor Promedio Anual (fase ENSO neutra)	Valor Máximo (período oct–nov + años La Niña moderada)	Determinante Principal del Suelo y Coeficiente de Correlación con los Nutrientes del Suelo (UPAs centinela)
Fibra neutro detergente (FND, % MS) — inversamente relacionada con digestibilidad	56–64% (FND alto → menor digestibilidad)	48–52%	38–44% (FND bajo → mayor digestibilidad)	Temperatura media del suelo: $r = -0,52$ ($p < 0,001$). El FND aumenta cuando el suelo está frío: la menor disponibilidad de N reduce la síntesis de proteínas en el pasto y aumenta la proporción de celulosa y hemicelulosa (fracción de fibra). P disponible: $r = -0,38$ ($p < 0,01$).
Digestibilidad in vitro de la MS (DIVMS, %)	51–56% (meses fríos + El Niño)	64–72% según tipo (Tipo I: 64,2%; Tipo IV: 71,2%)	74–78% (meses cálidos + fase La Niña moderada con T adecuada)	N mineral del suelo: $r = +0,68$ ($p < 0,001$); P disponible: $r = +0,44$ ($p < 0,01$); T_suelo: $r = +0,58$ ($p < 0,001$). La DIVMS es el determinante más directo de la energía metabolizable del forraje y de la producción de leche (Cap. 8).
Energía metabolizable (EM, Mcal/kg MS)	1,58–1,72 Mcal/kg MS (pasto de baja calidad; debajo del umbral de mantenimiento de 1,65 Mcal/kg MS)	1,88–2,12 según tipo	2,18–2,34 Mcal/kg MS (pasto de alta calidad en meses óptimos)	DIVMS: $r = +0,94$ ($p < 0,001$; la EM se calcula directamente a partir de la DIVMS). N mineral: $r = +0,62$; T_suelo: $r = +0,52$. La EM $< 1,65$ Mcal/kg MS indica que el pasto

Variable de Calidad del Forraje	Valor Mínimo (período julio–agosto + años El Niño)	Valor Promedio Anual (fase ENSO neutra)	Valor Máximo (período oct–nov + años La Niña moderada)	Determinante Principal del Suelo y Coeficiente de Correlación con los Nutrientes del Suelo (UPAs centinela)
	para bovinos adultos)			no cubre ni siquiera las necesidades de mantenimiento del bovino adulto; en estos períodos la producción de leche cae a cero y el animal pierde peso.
Relación PC:EM (indicador de balance proteína–energía del forraje)	0,038–0,052 (desequilibrio por PC baja en El Niño; la vaca recibe suficiente energía pero insuficiente proteína)	0,082–0,096 (relación cercana a la óptima para bovinos en producción)	0,098–0,114 (La Niña con T baja puede producir exceso relativo de PC respecto a la energía disponible, cuyo efecto se analiza en el Cap. 8)	N mineral del suelo: r con PC = +0,78; r con EM = +0,62. El desequilibrio PC:EM es mayor durante El Niño porque el N mineral cae más rápido que la energía disponible del forraje; la corrección del balance requiere suplementación proteica, no energética, durante estos episodios.

Nota. Elaboración propia.

7.6.1 El Coeficiente N mineral–PC como el Eslabón 4→5 de la Cadena Causal

El coeficiente de correlación N_mineral–PC ($r = +0,78$ para el Tipo I; $r = +0,62$ para el Tipo IV) y la pendiente de la relación (+2,8 pp de PC por cada 10 mg/kg de aumento en el N mineral del suelo) son los parámetros que hacen posible trazar la cadena causal completa desde el ONI hasta la producción de leche a través de los nutrientes del suelo y la calidad del forraje. La cadena cuantitativa es la siguiente:

Cadena causal cuantificada (Eslabones 3–5) para el Tipo I durante un fuerte evento de El Niño:

Eslabón 3–4: Durante el fuerte El Niño, la temperatura del suelo disminuye 2,1 °C en las áreas de páramo alto. Como consecuencia, el nitrógeno mineral se reduce de 28 a 12 mg/kg, lo que representa una disminución del 58% (ver Tabla 6.4).

Eslabón 4–5 (cantidad): La caída en el nitrógeno mineral, que es de -16 mg/kg, se multiplica por β_N (24,8 kg MS/mg N), lo que resulta en una reducción de -397 kg MS/ha disponibles para el pastizal durante este episodio.

Eslabón 4–5 (calidad): La disminución de -16 mg/kg de nitrógeno mineral provoca que el contenido de proteína cruda (PC) baje en 4,5 puntos porcentuales. Esto se calcula dividiendo -16 mg/kg entre 10, y multiplicando el resultado por 2,8 pp/10 mg, lo que da 4,5 pp. Como resultado, el PC pasa del 16,8% al 12,3%. También, la digestibilidad de la materia seca (DIVMS) desciende de 64,2% a 57,8%.

Resultado observable: Esto se traduce en una reducción del PPNA del 42% (ver Tabla 7.4), una disminución del PC en 4,5 pp y una caída en la DIVMS de 6,4 pp. En conjunto, esto significa una reducción en la disponibilidad de la base forrajera para la producción de leche, que Cap. 8 convierte en litros por vaca por día.

Esta cadena cuantitativa representa la concreción del proyecto en una única pantalla.

Cada coeficiente de la cadena se deriva de un análisis detallado de los Capítulos 4 a 7, y juntos constituyen el modelo integrado que se formaliza en el Capítulo 9 como un SEM completo.

Además, el Capítulo 10 utiliza este modelo para calcular las pérdidas económicas en el corredor.

7.7 Las Series Históricas de PPNA (2018–2024) Reconstruidas con NDVI Sentinel-2

7.7.1 La Extensión Temporal con Imágenes Satelitales

Durante 24 meses, se realizaron mediciones directas utilizando jaulas de exclusión, lo que proporcionó la mayor precisión, aunque con una cobertura temporal limitada. Para analizar

cómo eventos climáticos extremos, como El Niño de 2015–2016 o La Niña de 2010–2012, han afectado los datos de PPNA en el corredor del Carchi, el proyecto recurre a imágenes de Sentinel-2 que están disponibles desde 2017.

Se emplea una correlación calibrada de NDVI y biomasa ($R^2 = 0,72$; RMSE = 280 kg MS/ha) para reconstruir la serie de PPNA estimada entre 2018 y 2024 en todas las Unidades de Producción Agrícola (UPAs) del proyecto. Esta reconstrucción permite llevar a cabo tres tipos de análisis que no podrían realizarse solo con los 24 meses de datos primarios.

Primero, el análisis de tendencias a largo plazo: la PPNA estimada del corredor muestra una tendencia general de estabilidad entre 2018 y 2024, sin una tendencia lineal significativa. La variabilidad interanual está influenciada principalmente por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

En segundo lugar, se verifica la precisión de los modelos: las predicciones del modelo recalibrado (Tabla 7.3) se aplican a las series climáticas históricas y se comparan con las anomalías de NDVI durante los eventos de La Niña de 2022–2023 y el moderado El Niño de 2023–2024, con el fin de validar los coeficientes utilizados.

Por último, se identifica espacialmente las áreas del corredor que son más vulnerables: el análisis de la variabilidad del NDVI interanual, en el mapa de resolución de 10 m de Sentinel-2, revela que las zonas con mayor variabilidad —las más susceptibles a eventos climáticos extremos— se encuentran en los páramos altos de los cantones Espejo y Bolívar. Este hallazgo es coherente con la distribución de los sistemas del Tipo I que se diagnosticaron en el Capítulo 1.

7.8 Integración con la Cadena Causal: Lo que Este Capítulo Provee para los Análisis Siguientes

7.8.1 Los Parámetros Transmitidos al Capítulo 8

En el Capítulo 8, se requieren tres tipos de insumos del Capítulo 7 para desarrollar los modelos de producción de leche:

- PPNA según el tipo de sistema, en condiciones normales y durante eventos extremos (ver Tablas 7.2 y 7.4): aquí, la disponibilidad de forraje se considera como la variable de entrada para el modelo de consumo voluntario del ganado bovino.

- Calidad nutricional del forraje (PC, DIVMS, EM) clasificada por tipo de sistema y período (consultar Tabla 7.5): esta calidad influye directamente en el consumo voluntario. Por ejemplo, un pasto con alta digestibilidad tiende a ser más consumido y produce más leche por cada kilogramo de materia seca que se ingiere, además de afectar la conversión del forraje en leche.
- Coeficientes de correlación entre nutrientes del suelo y calidad del forraje (Tabla 7.5): esto es crucial para que el SEM del Capítulo 9 pueda integrar la cadena nutriente_suelo → calidad_forraje → producción leche como un camino directo en su estructura causal, eliminando la necesidad de medir la calidad del forraje de forma independiente a los nutrientes del suelo.

Adicionalmente, el Capítulo 9 requiere el modelo recalibrado de PPNA (Tabla 7.3), incluyendo sus coeficientes de temperatura del suelo y nitrógeno mineral. Esto se utilizará como la ecuación para la producción de biomasa en el SEM completo, junto con los datos históricos de PPNA reconstruidos mediante NDVI, que servirán como la serie temporal de la variable dependiente de biomasa en los modelos de panel de los Capítulos 9 y 10.

7.9 Síntesis del capítulo

En lo que respecta al protocolo de medición de biomasa (ver Tabla 31), se usaron cuatro métodos complementarios: jaulas de exclusión, corte y pesaje, Rising Plate Meter (RPM) y NDVI de Sentinel-2. Esta sinergia de métodos ha ofrecido la posibilidad de contrastar las mediciones directas de biomasa con la información de mayor cobertura espacial y temporal, mejorando la evaluación de la rentabilidad de los pastizales del corredor ganadero del Carchi.

Los resultados de la PPNA (Tabla 32) mostraron claras diferencias entre los sistemas ganaderos estudiados, donde se observó un aumento en la producción desde el Tipo I hasta el Tipo IV, con valores de 2.180, 4.640, 7.480 y 9.820 kg de MS/ha/año. Igualmente, se observaron diferencias en la calidad nutricional asociada y la composición florística. El modelo recalibrado de la PPNA (Tabla 33) y las condiciones climáticas y edáficas, y especialmente la precipitación, la temperatura del suelo y la disponibilidad de N mineral, ayudan a explicar el rango de variaciones en cuanto a la productividad forrajera.

Los fenómenos climáticos extremos afectaron tanto la cantidad y calidad de la biomasa, tal y como indica en la Tabla 34 El evento El Niño y las heladas severas fueron los que provocaron

las caídas mayores de PPNA, para el fenómeno de La Niña se produjeron efectos contrarios sobre la producción y la calidad del forraje. Los sistemas de mayor altitud, en este caso el Tipo I, presentaron mayor sensibilidad. También se encontraron relaciones entre el nitrógeno mineral del suelo y el contenido de proteína y la digestibilidad del forraje (Tabla 35), lo que prueba la conexión entre las condiciones climatológicas, la dinámica de los nutrientes y la productividad forrajera.

CAPÍTULO 8

Producción de Leche:

De la Base Forrajera al Rendimiento del Hato

Producción basal por tipo de sistema, modelo integrado forraje–leche con correcciones por PC y THI, impacto cuantificado del ENSO sobre la producción, descomposición de los mecanismos de transmisión, validación con datos ESPAC provinciales, y escenarios al 2035 y 2050 con y sin adaptación



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** la línea de base de producción de leche por tipo de sistema ganadero del corredor del Carchi, incluyendo la producción media por vaca, la estacionalidad mensual, el intervalo entre partos y el porcentaje de suplementación, identificando cómo estas variables reflejan la vulnerabilidad climática diferencial de los cuatro tipos.
- **Aplicar** el modelo integrado de producción de leche —basado en el consumo voluntario de MS, el balance energético NRC simplificado y las correcciones por PC del forraje y por THI— a los datos del corredor del Carchi, comprendiendo los parámetros estimados por tipo de sistema y sus fuentes.

- **Cuantificar** el impacto de las cuatro fases del ENSO sobre la producción de leche por tipo de sistema, con la descomposición porcentual del efecto total en sus mecanismos de transmisión: reducción de cantidad de forraje, reducción de calidad (PC), reducción de digestibilidad (DIVMS) y heladas anómalas.
- **Explicar** por qué el impacto de La Niña sobre la producción de leche está dominado por la caída de la calidad del forraje (74% del efecto durante La Niña moderada) y no por la reducción de la cantidad, y cuáles son las implicaciones de esta asimetría para el diseño de los instrumentos de suplementación de emergencia.
- **Validar** el modelo de producción de leche con los datos provinciales del ESPAC para los eventos El Niño 2015–2016, La Niña 2010–2012 y El Niño moderado 2009–2010, y comprender las limitaciones de esa validación.
- **Interpretar** los cinco escenarios de producción de leche al 2035 y 2050 —dos sin adaptación bajo RCP 4.5 y RCP 8.5, y dos con adaptación moderada e integral— en términos del punto de inflexión de inviabilidad económica de los sistemas del Tipo I.

8.1 Introducción: El Eslabón Final de la Cadena Biofísica

El libro ha tejido una cadena de causas que, paso a paso, nos lleva a un eslabón crucial: la producción de leche. Comenzamos con el clima, que influye en la temperatura del suelo, lo que a su vez afecta la actividad microbiana. Esto impacta en los nutrientes del suelo y, finalmente, en la biomasa forrajera. Ahora, en este capítulo, todo eso se traduce en litros de leche por vaca, por día, así como en litros por finca diariamente. En los capítulos 9 y 10, veremos cómo estas cifras se convierten en ingresos para las familias ganaderas y en porcentajes comparativos con el año anterior.

La producción de leche no solo es un dato, sino el puente entre el entorno físico que hemos analizado y el mundo económico. Es la variable que el mercado compra y paga, la que se refleja en las estadísticas del INEC–ESPAC y en los contratos de las empresas lácteas. Además, es la variable más observable, con un amplio acceso a datos históricos para la región del Carchi, lo que la convierte en un punto clave para validar el modelo integrado (Medina et al., 2024).

Este capítulo es el más complejo de la Parte III, ya que reúne en un único modelo de producción todos los insumos biofísicos que discutimos en los capítulos 4 a 7. Esto incluye la disponibilidad de forraje (PPNA), la calidad nutricional (PC, DIVMS, EM), las limitaciones

climáticas (como el THI para el estrés por calor) y las características del ganado (peso, raza, estado reproductivo). Esta complejidad es indispensable porque la producción de leche no depende de un solo factor, sino de cómo interactúan todos: por ejemplo, una vaca con alta genética puede producir menos leche si se alimenta con forraje de mala calidad, en comparación con una vaca de producción media que tenga acceso a forraje de excelente calidad. El modelo debe captar estas interacciones para que las proyecciones sobre el impacto climático sean precisas.

8.2 Línea de Base de Producción de Leche por Tipo de Sistema

Tabla 36.

Línea de Base de Producción de Leche, Características del Hato y Parámetros Reproductivos por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (período de fase ENSO neutra 2023–2024)

Variable de Producción	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Semi-tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial (2.200–2.600 msnm)
Producción media diaria por vaca en ordeño (L/vaca/día; base anual; período de fase ENSO neutra 2023–2024)	7,4 ± 1,8 L/vaca/día; rango: 4,2–11,6; alta variabilidad por sensibilidad climática, raza predominante (cruzada Normando × Holstein) y manejo extensivo	12,8 ± 2,4 L/vaca/día; rango: 7,8–17,2	18,4 ± 2,8 L/vaca/día; rango: 12,8–23,6	26,2 ± 3,2 L/vaca/día; rango: 19,4–32,8; predominio de Holstein puro con suplementación energética en los meses de menor oferta forrajera
Número de vacas en ordeño por finca (promedio)	8,4 vacas en ordeño / finca (18% de la capacidad de carga máxima estimada)	14,2 vacas en ordeño / finca	22,6 vacas en ordeño / finca	38,4 vacas en ordeño / finca
Producción diaria total por finca (L/finca/día)	62 ± 22 L/finca/día	182 ± 46 L/finca/día	416 ± 84 L/finca/día	1.006 ± 182 L/finca/día La diferencia de 16,2× entre Tipo I y Tipo IV en producción total/finca es mayor que la diferencia de 3,5× en producción/vaca, porque el Tipo IV también tiene más vacas/finca

Variable de Producción	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Semi-tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial (2.200–2.600 msnm)
Raza predominante en el hato (% de UPAs)	Cruzada Normando × Holstein: 62%; Normando puro: 22%; Holstein × criollas: 16%	Cruzada Holstein × Normando: 48%; Holstein puro: 28%; Normando × criollas: 24%	Holstein puro: 52%; Cruzada Holstein × Jersey: 24%; Otras razas lecheras mejoradas: 24%	Holstein puro: 78%; Otros bovinos lecheros de alta producción: 22%
Coefficiente de variación de la producción entre meses del año (CV mensual)	CV: 38,4% (la mayor estacionalidad productiva del corredor; producción de verano: 4,8–5,2 L/vaca/día; producción de primavera: 9,8–11,4 L/vaca/día)	CV: 28,6%	CV: 18,4%	CV: 12,2% El CV mensual es el indicador de la vulnerabilidad a la estacionalidad climática: a mayor CV, mayor desajuste entre la oferta estacional de leche y los contratos estables de venta
Porcentaje de fincas con suplementación forrajera sistemática (silo, heno, balanceado)	12% (suplementación de emergencia ocasional; 82% depende exclusivamente del pastizal)	34%	68%	92% La suplementación desacopla parcialmente la producción de leche de la variabilidad del pastizal, lo que explica el menor CV mensual del Tipo IV; el costo de la suplementación aumenta con los eventos El Niño en el Tipo IV (ver Cap. 10)
Intervalo entre partos (días; promedio de la finca)	428 ± 42 días (reproducción afectada por el balance energético negativo frecuente en el Tipo I durante El Niño y el verano)	398 ± 36 días	372 ± 28 días	342 ± 22 días El intervalo entre partos del Tipo I (428 días) vs. el óptimo técnico (365 días) implica que cada vaca del Tipo I produce aproximadamente 63 días menos de leche por año que

Variable de Producción	Tipo I Páramo extensivo (3.200–3.800 msnm)	Tipo II Semi-tecnificado (2.800–3.200 msnm)	Tipo III Tecnificado (2.400–2.800 msnm)	Tipo IV Empresarial (2.200–2.600 msnm)
				una vaca del Tipo IV con el mismo potencial genético; el balance energético negativo es el mecanismo principal
Porcentaje de descarte forzoso de vacas en años El Niño fuerte (respecto a descarte normal)	+28% descarte adicional (vacas que no quedan preñadas o que caen en $CC \leq 2,0$ durante el episodio son vendidas involuntariamente)	+ 18% descarte adicional	+ 8% descarte adicional	+ 3% descarte adicional El descarte forzoso durante El Niño fuerte es un costo irreversible que no se recupera en la siguiente temporada productiva; su impacto económico se cuantifica en el Cap. 10

Nota. Elaboración propia con base en datos primarios del proyecto (UPEC, 2023–2024) y registros de centros de acopio del Carchi.

8.2.1 La Diferencia de 3,5× entre Tipos: Genética, Forraje y Manejo

La diferencia en producción de leche por vaca entre el Tipo I, que produce 7,4 litros al día, y el Tipo IV, con 26,2 litros diarios, es un factor de 3,5 veces. Esto es notablemente inferior a la diferencia en el PPNA, que es de 4,5 veces entre los mismos tipos, como se menciona en el Capítulo 7.

Esta reducción en el diferencial se debe a dos factores. Primero, el Tipo IV cuenta con una genética más exigente, siendo Holstein puro, capaz de alcanzar hasta 40 litros por vaca al día en condiciones óptimas. Sin embargo, esta raza también es más sensible a la falta de forraje, lo que resulta en que la diferencia de producción observada en condiciones de campo sea menor que la diferencia genética en un entorno controlado.

En segundo lugar, el 92% de las fincas del Tipo IV implementa suplementación forrajera de manera sistemática, lo que desvincula en parte la producción de leche de las variaciones del pastizal.

Al observar la Tabla 8.1, que compara el intervalo entre partos (IEP) por tipo, se revela que el impacto del clima en la producción de leche también tiene una dimensión reproductiva que las cifras de producción diaria no reflejan de forma directa. El IEP del Tipo I es de 428 días, mientras que el IEP ideal es de 365 días. Esto indica que las vacas del Tipo I pasan un 17% de su vida productiva sin lactar. Esta situación no es una elección del ganadero, sino que se debe a un balance energético negativo crónico durante los períodos de déficit de forraje, lo que afecta su capacidad reproductiva.

Este costo oculto se traduce, en términos de litros de leche no producidos al año por vaca, en una pérdida significativa, la cual se analiza con más detalle en el Capítulo 10.

8.3 El Modelo Integrado de Producción de Leche: de la Base Forrajera al Rendimiento del Hato

Tabla 37.

Especificación del Modelo Integrado de Producción de Leche del Corredor del Carchi: Componentes, Ecuaciones, Parámetros Estimados y Validación

Componente del Modelo	Especificación Matemática	Parámetros Estimados para el Corredor del Carchi (por tipo de sistema)	Relevancia para la Cadena Causal y Articulación con los Caps. 6–7
Consumo voluntario de MS (CMS, kg MS/vaca/día) en función de la disponibilidad y calidad del forraje	$CMS = a \times PV^{0,75} \times (1 + b \times DIVMS) \times \min(1; PPNA_{disponible} / CMS_{m\acute{a}x})$ donde PV es el peso vivo de la vaca (kg), DIVMS la digestibilidad del forraje (fracción), y min(·) es la función que activa la restricción de disponibilidad cuando el pastizal no puede cubrir la demanda	a: 0,048–0,054 según tipo (mayor en tipos con razas de alta producción); b: 0,62–0,74 (el coeficiente de estímulo de la digestibilidad sobre el consumo); CMS_máx: 15–22 kg MS/vaca/día según peso vivo y raza. PV promedio: Tipo I: 420 kg; Tipo IV: 580 kg	El término min(·) es el que activa el eslabón 5→6 de la cadena causal: cuando la PPNA_disponible cae por debajo de la demanda del hato (el escenario El Niño), el CMS se reduce y con él la producción de leche, independientemente del potencial genético de la vaca.
Producción de leche en función del consumo de nutrientes (modelo NRC simplificado)	$L_{leche} = \max(0; (EM_{ingerida} - EM_{mantenimiento}) / EM_{por\ litro\ leche})$ donde EM_ingerida = CMS × EM_forraje (Mcal/kg MS),	EM_mantenimiento: Tipo I (PV=420 kg): 24,8 Mcal/día; Tipo IV (PV=580 kg): 31,4 Mcal/día. EM_por_litro: 0,74 Mcal/L (constante para las razas del corredor,	La ratio (EM_ingerida – EM_mantenimiento) es el 'excedente energético para producción' que puede destinarse a leche o a reservas corporales (condición corporal). Durante El Niño fuerte, la

Componente del Modelo	Especificación Matemática	Parámetros Estimados para el Corredor del Carchi (por tipo de sistema)	Relevancia para la Cadena Causal y Articulación con los Caps. 6–7
	$EM_{\text{mantenimiento}} = 0,08 \times PV^{0,75}$ (necesidades de mantenimiento), $EM_{\text{por litro leche}} = 0,74 \text{ Mcal/L}$ (energía requerida para sintetizar 1 litro de leche con 3,5% de grasa)	validado con datos del programa de mejoramiento genético del MAGAP-Carchi). La función $\max(0; \cdot)$ asegura que la producción no sea negativa cuando $EM_{\text{ingerida}} < EM_{\text{mantenimiento}}$.	EM del forraje cae por debajo del umbral de mantenimiento en el Tipo I, forzando la movilización de reservas y la suspensión de la producción de leche.
Corrección por proteína cruda (PC) del forraje cuando PC limita antes que la energía	$L_{\text{leche_corregida}} = L_{\text{leche}} \times \min(1; PC_{\text{ingerida}} / PC_{\text{requerida}})$ donde $PC_{\text{requerida}} = 0,105 + 0,070 \times L_{\text{leche}}$ (kg PC/kg MS de ración; crece con la producción de leche según el NRC, 2001)	En los sistemas del Tipo I durante El Niño fuerte, $PC_{\text{ingerida}} / PC_{\text{requerida}} = 0,78–0,88$ (la vaca no alcanza a cubrir las necesidades proteicas para sostener su producción), produciendo una reducción adicional del 12–22% sobre la reducción ya calculada por la restricción energética.	Este es el mecanismo del desequilibrio PC:EM documentado en la Tabla 7.5: durante El Niño, la PC del forraje cae más rápido que la EM, creando una deficiencia proteica que limita la producción de leche incluso cuando la energía disponible podría sostener una producción algo mayor. La corrección por PC es el eslabón más novedoso del modelo respecto a los modelos de la literatura del corredor.
Corrección por estrés calórico (THI) para sistemas del valle interandino (Tipo III y IV)	$L_{\text{leche_THI}} = L_{\text{leche_corregida}} \times (1 - k \times \max(0; THI_{\text{diario_max}} - 68))$ donde k es el coeficiente de reducción por unidad de THI sobre el umbral de 68	$k = 0,018 \text{ L}/(\text{vaca} \cdot \text{día})$ por unidad de THI sobre 68 (estimado local de la encuesta; West (2003) reporta 0,2–0,4 kg/día por unidad THI, equivalente a 0,015–0,032 L/día). El $THI_{\text{diario_max}}$ supera 68 en los meses de enero–febrero en el Tipo IV durante años El Niño fuerte (ver Cap. 4, Tabla 4.5).	Actualmente el estrés calórico es un factor marginal en el corredor del Carchi ($THI < 68$ en $> 95\%$ de los días en el período histórico). Su inclusión en el modelo es prospectiva: al 2050 bajo RCP 8.5, el THI máximo diario superará 68 en 20–30 días/año en el Tipo IV (Cap. 4, Tabla 4.6), convirtiendo el estrés calórico en un factor limitante relevante por primera vez en la historia del corredor.
Calibración y validación del modelo integrado	Calibración: datos de producción de leche mensual (SENPLADES–MAGAP registro de	R^2 de validación (comparación modelo vs. datos de producción de leche de las UPAs centinela): Tipo I: 0,72;	Los R^2 de validación del modelo de producción de leche (0,72–0,78) son menores que los del modelo de PPNA (0,79) porque la

Componente del Modelo	Especificación Matemática	Parámetros Estimados para el Corredor del Carchi (por tipo de sistema)	Relevancia para la Cadena Causal y Articulación con los Caps. 6–7
	acopio, 2020–2024) para el total de las 80 UPAs del proyecto; ajuste de los parámetros a, b, k por tipo de sistema mediante optimización por mínimos cuadrados no lineales.	Tipo II: 0,74; Tipo III: 0,76; Tipo IV: 0,78. RMSE de validación: Tipo I: 0,82 L/vaca/día; Tipo IV: 1,24 L/vaca/día (mayor en el Tipo IV por mayor variabilidad de la suplementación entre fincas).	producción de leche tiene determinantes adicionales no capturados por los factores forrajeros (estado sanitario del hato, manejo del ordeño, calidad genética de los toros). Estos factores no climáticos explican el 22–28% de la varianza no explicada del modelo.

Nota. Elaboración propia.

8.3.1 El Papel Central de la Proteína Cruda en el Modelo

Una de las innovaciones más significativas de este modelo, en comparación con los modelos existentes en la literatura sobre corredores, es la corrección explícita por PC del forraje. Esto se refiere al factor $\min(1; PC_ingerida / PC_requerida)$, que disminuye la producción de leche cuando la proteína consumida no es suficiente para mantener la producción calculada según el balance energético.

Este elemento permite al modelo captar el efecto de La Niña moderada. En este contexto, la restricción de PC juega un papel predominante, representando el 74% del efecto total, en comparación con la restricción energética, que solo contribuye con un 26%. Los modelos que se basan únicamente en el balance energético tienden a pasar por alto esta dinámica.

En términos prácticos, esto significa que las estimaciones de las pérdidas en la producción de leche durante los eventos de La Niña que no consideran la corrección por PC tienden a subestimar el impacto en un rango que oscila entre el 30% y el 50% para los sistemas del Tipo I. Por ejemplo, mientras que un modelo que no incorpora la corrección por PC podría prever una caída del -3% durante una La Niña moderada (basándose solo en la reducción de la cantidad de PPNA), el modelo completo estima una reducción del -12%, ya que también incluye la disminución en la calidad.

Esta diferencia de cuatro veces en la estimación del impacto se traduce en variaciones igualmente significativas en las proyecciones de pérdidas económicas presentadas en el Capítulo 10.

"La vaca no está enferma. El pasto está aguado. Hay mucho, pero tiene poca fuerza. La leche baja igual que con la sequía, solo que uno no lo ve venir porque el campo se ve verde." (Testimonio de ganadero del Tipo I, cantón Espejo, diciembre 2022 — inicio de La Niña 2022–2023).

8.4 Impacto del ENSO sobre la Producción de Leche: Cuantificación por Tipo de Sistema

Tabla 38.

Impacto Cuantificado de las Cuatro Fases del ENSO sobre la Producción de Leche por Tipo de Sistema del Corredor Ganadero del Carchi, con Validación Externa contra los Datos del ESPAC

Fase del ENSO	Reducción de Producción de Leche en Tipo I (L/vaca/día y % respecto al año de fase neutra)	Reducción en Tipo II	Reducción en Tipo III	Reducción en Tipo IV — Mecanismo dominante y descomposición del efecto
El Niño moderado (ONI 0,5–1,4; duración media 5 meses; referencia 2023–2024)	–1,8 L/vaca/día (–24%); de 7,4 a 5,6 L; reducción PC del forraje de 16,8% a 11,4%; contribuye el 62% del efecto total; reducción de PPNA disponible: contribuye el 38% del efecto	–2,4 L/vaca/día (–19%); de 12,8 a 10,4 L	–2,8 L/vaca/día (–15%); de 18,4 a 15,6 L	–2,6 L/vaca/día (–10%); de 26,2 a 23,6 L; efecto de déficit forrajero parcialmente compensado por suplementación (+18% de costo de suplementación durante el episodio)
El Niño fuerte (ONI > 1,5; duración media 8 meses; ref. reconstruido 2015–2016)	–3,8 L/vaca/día (–51%); de 7,4 a 3,6 L; PC del forraje cae por debajo del umbral de mantenimiento en 3 de los 8 meses del episodio: 28% de las vacas suspende la producción de leche durante 3–5 semanas; heladas anómalas en 4 eventos contribuyen con	–4,4 L/vaca/día (–34%); de 12,8 a 8,4 L	–4,2 L/vaca/día (–23%); de 18,4 a 14,2 L	–3,8 L/vaca/día (–15%); de 26,2 a 22,4 L; el Tipo IV absorbe mejor el impacto por suplementación, pero el costo de la suplementación de emergencia aumenta en USD 0,08–0,12/L producido durante el episodio

Fase del ENSO	Reducción de Producción de Leche en Tipo I (L/vaca/día y % respecto al año de fase neutra)	Reducción en Tipo II	Reducción en Tipo III	Reducción en Tipo IV — Mecanismo dominante y descomposición del efecto
	el 12% del efecto total			
La Niña moderada (ONI -0,5 a -1,4; duración 6 meses; ref. 2022–2023)	-0,9 L/vaca/día (-12%); paradoja: PPNA en cantidad -8% pero calidad del forraje cae más que la cantidad (PC -4,4 pp, de 16,8% a 12,4%); la reducción se explica en un 74% por la caída de la calidad del forraje y solo en un 26% por la caída de la cantidad	-0,8 L/vaca/día (-6%); de 12,8 a 12,0 L	-0,6 L/vaca/día (-3%); de 18,4 a 17,8 L	-0,4 L/vaca/día (-2%); de 26,2 a 25,8 L El impacto de La Niña moderada sobre la producción de leche es cualitativamente diferente al de El Niño: menor magnitud pero dominado por la caída de la calidad del forraje, no de la cantidad; el mecanismo es la anaerobiosis parcial del suelo → inhibición de la nitrificación → menor N mineral → menor PC del pasto → menor producción de leche
La Niña fuerte (ONI < -1,5; duración 10 meses; ref. reconstruido 2010–2012)	-1,4 L/vaca/día (-19%) durante el episodio; + efecto de arrastre: -0,6 L/vaca/día (-8%) adicional en el año siguiente al episodio por el daño estructural al suelo y al pastizal; efecto total acumulado en 2 años: -1,9 L/vaca/día equivalente	-1,2 L/vaca/día (-9%) + efecto de arrastre -0,4 L/vaca/día	-0,8 L/vaca/día (-4%) + efecto de arrastre -0,2 L/vaca/día	-0,6 L/vaca/día (-2%) sin efecto de arrastre significativo El efecto de arrastre post-La Niña fuerte (la reducción que persiste en el año siguiente) es el componente que diferencia a los eventos La Niña fuertes de los moderados; los sistemas del Tipo IV con mayor capacidad de recuperación del suelo (menor daño por compactación) no presentan efecto de arrastre significativo

Fase del ENSO	Reducción de Producción de Leche en Tipo I (L/vaca/día y % respecto al año de fase neutra)	Reducción en Tipo II	Reducción en Tipo III	Reducción en Tipo IV — Mecanismo dominante y descomposición del efecto
Comparación con datos provinciales del ESPAC (validación externa del modelo)	ESPAC 2016 (El Niño fuerte): – 18,4% producción provincial; ESPAC 2011 (La Niña fuerte): – 9,8%; ESPAC 2010 (El Niño moderado): – 12,4%. Modelo ponderado por participación de cada tipo en el total provincial): El Niño fuerte: – 18,8% (error: +0,4 pp); La Niña fuerte: – 10,2% (error: +0,4 pp); El Niño moderado: – 11,9% (error: – 0,5 pp).	Los errores del modelo vs. el ESPAC son < 1 pp para los tres eventos de validación, lo que confirma que el modelo captura adecuadamente el impacto a nivel provincial a pesar de estar construido con datos de UPAs centinela.	El ESPAC provee solo el total provincial; la desagregación por tipo de sistema de la Tabla 8.3 es una proyección del modelo que no puede validarse directamente con datos provinciales por falta de datos desagregados.	La diferencia entre el impacto modelado del El Niño fuerte en el Tipo I (–51%) y el promedio provincial (–18,4%) refleja que los sistemas del Tipo I representan solo el 22% de la producción provincial; si representarían el 100%, el impacto provincial habría sido del –51%. El ESPAC agrega los impactos muy diferentes de los cuatro tipos de sistema en un promedio que subestima la vulnerabilidad de los ganaderos del Tipo I.

Nota. Elaboración propia con base en datos del proyecto (UPEC, 2023–2024) e INEC-ESPAC (2009–2017).

8.4.1 La Asimetría de Mecanismos entre El Niño y La Niña

La Tabla 38 menciona y mide la desigualdad entre El Niño y La Niña que se mencionó en el Capítulo 6 en relación con los nutrientes del suelo, pero ahora se centra en la producción de leche.

El impacto de un fuerte El Niño es notablemente mayor, con una reducción de –3,8 L por vaca al día en el Tipo I, lo que representa un 51%, en comparación con un fuerte La Niña que disminuye solo –1,4 L por vaca al día, equivalente a un 19%. Sin embargo, los mecanismos detrás de estos fenómenos son fundamentalmente distintos.

El Niño provoca un derrumbe tanto en la cantidad como en la calidad de la oferta forrajera, mientras que La Niña afecta principalmente la calidad, teniendo un efecto menos severo sobre la cantidad

Esta diferencia en los mecanismos provoca repercusiones directas en el sistema de seguro agrícola del corredor. Un seguro que se basa en el nivel de lluvia (índice climático) solo activa los pagos cuando las precipitaciones son escasas (El Niño), pero no responde cuando llueve en abundancia y la calidad del pasto se vea afectada (La Niña).

Un sistema de seguro que dependa únicamente del índice de precipitación podría dejar sin compensación entre el 30% y el 50% de los años que presentan un impacto económico significativo en el corredor del Carchi.

Por esta razón, el diseño del instrumento de seguro propuesto en el Capítulo 13 incluye un componente dual: un índice de lluvias ($SPI-3 < -1,0$ para El Niño) junto con un índice de calidad forrajera ($PC \text{ estimada} < 12\%$ durante más de 3 semanas para La Niña), lo que activará el pago cuando cualquiera de los dos indicadores cruce su umbral crítico.

8.5 Descomposición de los Mecanismos de Transmisión del ENSO a la Producción de Leche

Tabla 39.

Descomposición del Impacto del ENSO sobre la Producción de Leche del Tipo I en sus Mecanismos de Transmisión, con Implicaciones para el Diseño de Instrumentos de Política

Mecanismo de Transmisión	Contribución al Impacto Total sobre la Producción de Leche del Tipo I durante El Niño Fuerte	Contribución durante La Niña Moderada	Implicación para la Estrategia de Adaptación y el Diseño de Instrumentos de Política
Reducción de la cantidad de biomasa forrajera disponible ($\downarrow$ PPNA $\rightarrow$ $\downarrow$ CMS $\rightarrow$ $\downarrow$ leche)	38% del impacto total ($-1,4$ L/vaca/día de los $-3,8$ totales)	26% del impacto total ($-0,2$ L/vaca/día de los $-0,9$ totales)	Instrumento prioritario durante El Niño: suplementación forrajera de emergencia con silo o heno que reemplace el déficit de PPNA. El umbral de activación: PPNA $< 60\%$ del basal por > 30 días consecutivos. Costo de suplementación estimado: USD $0,28-0,42/L$

Mecanismo de Transmisión	Contribución al Impacto Total sobre la Producción de Leche del Tipo I durante El Niño Fuerte	Contribución durante La Niña Moderada	Implicación para la Estrategia de Adaptación y el Diseño de Instrumentos de Política
			adicional de leche producida.
Reducción de la calidad nutricional del forraje (↓ PC → ↓ CMS por menor palatabilidad y menor tasa de paso ruminal → ↓ leche)	42% del impacto total (−1,6 L/vaca/día); el mecanismo dominante durante El Niño fuerte: la PC del forraje cae de 16,8% a 7,8–9,2%, muy por debajo del umbral de 14% necesario para la producción activa	74% del impacto total durante La Niña moderada (−0,7 L/vaca/día de los −0,9 totales); el mecanismo dominante durante La Niña: la PC cae sin que la PPNA se reduzca proporcionalmente	Instrumento prioritario durante La Niña: suplementación proteica con fuentes de proteína de sobrepaso (por ejemplo, torta de soya o harina de girasol) que compensen la caída de la PC del forraje. El umbral de activación: PC del forraje < 12% por > 3 semanas consecutivas. Costo estimado: USD 0,18–0,28/L adicional de leche producida.
Reducción de la digestibilidad del forraje (↓ DIVMS → ↓ EM ingerida por kg MS consumido → ↓ leche)	12% del impacto total (−0,5 L/vaca/día); actúa sobre el rendimiento energético por kg MS consumido, no sobre el CMS directamente	−0% (durante La Niña moderada, la DIVMS no cambia significativamente porque el exceso de agua no afecta el contenido de fibra en la misma proporción que las condiciones de sequía)	La reducción de la digestibilidad es un mecanismo secundario que amplifica el efecto de la reducción de la PC; sus instrumentos de corrección son los mismos que para la PC (suplementación proteica). No requiere un instrumento separado.
Heladas anómalas (daño foliar → reducción súbita de la PPNA disponible → ↓ CMS → ↓ leche)	8% del impacto total (−0,3 L/vaca/día); actúa como un shock puntual (3–7 días de impacto agudo) sobre la base de un impacto crónico más largo por El Niño	0% (las heladas no son un factor durante La Niña porque las noches están nubladas y la T no baja)	Instrumento específico para heladas: reservas de forraje diferido (potreros sin pastorear reservados para después de una helada); protocolos de manejo de emergencia post-helada (suplementación de 2–3 semanas hasta la recuperación del pastizal); sistemas de alerta temprana de heladas con los datos meteorológicos del INAMHI.

Mecanismo de Transmisión	Contribución al Impacto Total sobre la Producción de Leche del Tipo I durante El Niño Fuerte	Contribución durante La Niña Moderada	Implicación para la Estrategia de Adaptación y el Diseño de Instrumentos de Política
Balance energético negativo prolongado → reducción del intervalo entre partos → menor número de vacas en producción por año	No cuantificado en la producción de leche del episodio (efecto diferido), pero contribuye al costo económico acumulado: cada día adicional de intervalo entre partos representa USD 2,80–4,20 de pérdida de ingreso por vaca (cálculo del Cap. 10)	0% durante La Niña moderada (el balance energético negativo no es característico de La Niña en el Tipo I)	El balance energético negativo prolongado durante El Niño fuerte produce el aumento del intervalo entre partos de 428 a 480–520 días documentado en las UPAs centinela del Tipo I; la corrección requiere suplementación energética de mantenimiento (harina de maíz, melaza) antes de que la vaca entre en balance energético negativo severo ($CC \leq 2,5$), no después.

Nota. Elaboración propia.

8.5.1 El Mecanismo de la PC como el Más Importante y el Menos Atendido

Uno de los hallazgos más relevantes acerca de la descomposición de mecanismos el 42% del impacto del El Niño fuerte en la producción de leche del Tipo I se debe a la reducción de la calidad de la proteína (PC) del forraje, en lugar de la disminución de la biomasa, que es lo que normalmente se pensaría en una sequía (De la Cruz et al., 2018).

Este descubrimiento tiene importantes consecuencias prácticas. Un ganadero que nota que su pasto se vuelve amarillo y escaso durante El Niño puede, efectivamente, identificar la falta de biomasa y responder con suplementos forrajeros de emergencia. Sin embargo, si ese ganadero no evalúa la calidad de la proteína del forraje —lo cual requiere un análisis de laboratorio o un sensor NIRS que la mayoría de los ganaderos del Tipo I no posee— no se está dando cuenta del 42% del problema.

La recomendación que surge de este hallazgo es integrar el monitoreo de la calidad de la proteína del forraje en el sistema de alerta temprana del corredor. Cuando el SPI-3 cae por debajo de -1,0 (el umbral de quiebre no lineal mencionado en el Capítulo 6), el sistema de alerta debería sugerir no solo aumentar la suplementación forrajera, sino también realizar un análisis

de la calidad de la proteína del forraje disponible y activar la suplementación proteica si la PC baja de 12%, que es el límite operativo propuesto en el Capítulo 13.

8.6 Validación del Modelo con Datos Provinciales del ESPAC

8.6.1 El ESPAC como Punto de Referencia y sus Limitaciones

La validación del modelo utilizando los datos provinciales del ESPAC (Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua del INEC) para los años 2009, 2010, 2011, 2012 y 2016 muestra errores inferiores a 1 punto porcentual para los tres eventos con impacto documentado. En concreto, para El Niño 2015–2016 se observa un error de +0,4 pp; para La Niña 2010–2012 también +0,4 pp; y para El Niño moderado de 2009–2010, un error de -0,5 pp.

Si bien estos resultados son prometedores, es fundamental abordarlos con precaución. El ESPAC presenta coeficientes de variación que oscilan entre el 8% y el 15% en sus estimaciones provinciales. Esto significa que los errores de $\pm 0,4$ –0,5 pp del modelo se encuentran dentro del rango de incertidumbre de medición del propio indicador que se utiliza para la validación.

Una de las mayores limitaciones del ESPAC como herramienta de validación es que promedia la producción de los cuatro tipos de sistemas, lo que oculta el impacto diferencial que el modelo prevé. Por ejemplo, mientras que el ESPAC indica una reducción del -18,4% durante El Niño 2015–2016 para toda la provincia del Carchi, el modelo prevé una disminución del -51% para el Tipo I y del -15% para el Tipo IV.

Así, aunque el promedio provincial del -18,4% es correcto, resulta insuficiente desde el punto de vista informativo para el diseño de políticas. Conocer que el promedio cayó un -18,4% no proporciona información sobre a qué ganaderos se les debe brindar apoyo, con qué urgencia o qué tipo de instrumentos utilizar.

8.7 Escenarios de Producción de Leche al 2035 y 2050 bajo Cambio Climático

Tabla 40.

Escenarios de Producción de Leche al 2035 y 2050 bajo Cambio Climático y Distintos Niveles de Adaptación, por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi

Escenario y Horizonte Temporal	Cambio Proyectado en Producción de Leche del Tipo I (L/vaca/día y %)	Cambio Proyectado en Tipo II	Cambio Proyectado en Tipo III	Cambio Proyectado en Tipo IV — Supuestos del escenario y articulación con el análisis económico del Cap. 12
Escenario de tendencia sin adaptación (RCP 4.5; solo cambio climático; sin cambios en manejo)	–0,8 L/vaca/día al 2035 (–11%); –1,6 L/vaca/día al 2050 (–22%); mecanismo: precipitación – 5,6% al 2035 y – 10,2% al 2050 → PPNA páramo – 8,7% y –15,7% → PC forraje – 2,2 pp → producción de leche –11%–22%	–0,9 L/vaca/día al 2035 (–7%); – 1,8 L/vaca/día al 2050 (–14%)	–0,8 L/vaca/día al 2035 (–4%); – 1,4 L/vaca/día al 2050 (–8%)	–0,6 L/vaca/día al 2035 (–2%); –1,2 L/vaca/día al 2050 (–5%) Supuesto clave: la producción base se mantiene constante; solo cambia el factor climático. Este escenario subestima el impacto real porque no incluye el aumento proyectado de la frecuencia de eventos extremos (+38% en sequías al 2050 bajo RCP 4.5).
Escenario de tendencia sin adaptación (RCP 8.5; altas emisiones; sin cambios en manejo)	–1,4 L/vaca/día al 2035 (–19%); –2,8 L/vaca/día al 2050 (–38%); bajo RCP 8.5, la PPNA del páramo alto cae 27,8% al 2050 → los sistemas del Tipo I dejan de ser viables económicamente al costo de producción actual (> USD 0,38/L) cuando producen < 4,6 L/vaca/día	–1,6 L/vaca/día al 2035 (–13%); –3,2 L/vaca/día al 2050 (–25%)	–1,4 L/vaca/día al 2035 (–8%); – 2,4 L/vaca/día al 2050 (–13%)	–1,0 L/vaca/día al 2035 (–4%); +0,2 L/vaca/día al 2050 (+1%); el efecto del calentamiento sobre la PPNA del Tipo IV es marginalmente positivo (más cálido = más productivo) hasta que el estrés calórico supera el umbral de THI=68 al 2050 bajo RCP 8.5, invirtiendo el signo
Escenario con adaptación moderada (RCP 4.5;	–0,2 L/vaca/día al 2035 (–3%); +0,4 L/vaca/día al 2050 (+5%); el	–0,4 L/vaca/día al 2035 (–3%); +0,2 L/vaca/día al 2050 (+2%)	–0,2 L/vaca/día al 2035 (–1%); +0,6 L/vaca/día al 2050 (+3%)	–0,2 L/vaca/día al 2035 (–1%); +1,2 L/vaca/día al 2050 (+5%)

Escenario y Horizonte Temporal	Cambio Proyectado en Producción de Leche del Tipo I (L/vaca/día y %)	Cambio Proyectado en Tipo II	Cambio Proyectado en Tipo III	Cambio Proyectado en Tipo IV — Supuestos del escenario y articulación con el análisis económico del Cap. 12
implementación del paquete básico del Cap. 13: pasturas mixtas + fertilización fosfatada + encalado + reservas de forraje)	paquete básico de adaptación invierte la tendencia negativa en el Tipo I: la mejora de la fertilidad del suelo ($\beta_N = 24,8$ kg MS/mg N) más que compensa la reducción de la PPNA por el cambio climático			
Escenario con adaptación integral (RCP 4.5; paquete completo del Cap. 13: paquete básico + mejoramiento genético + seguro climático + sistema de alerta temprana SPI-3)	+0,6 L/vaca/día al 2035 (+8%); +1,8 L/vaca/día al 2050 (+24%); la adaptación integral neutraliza completamente el impacto climático y produce ganancias adicionales por el efecto combinado del mejoramiento genético y la mayor fertilidad del suelo	+0,8 L/vaca/día al 2035 (+6%); +2,4 L/vaca/día al 2050 (+19%)	+1,2 L/vaca/día al 2035 (+7%); +3,2 L/vaca/día al 2050 (+17%)	+2,4 L/vaca/día al 2035 (+9%); +4,8 L/vaca/día al 2050 (+18%) El escenario de adaptación integral ilustra que el cambio climático proyectado para el corredor del Carchi al 2050 es manejable con los instrumentos adecuados, a diferencia del escenario RCP 8.5 sin adaptación, que pone en riesgo la viabilidad económica de los sistemas del Tipo I.
Punto de inflexión de inviabilidad económica (Tipo I bajo RCP 8.5 sin adaptación)	Año estimado de cruce del umbral de inviabilidad (producción < 4,6 L/vaca/día con costo > USD 0,38/L): 2042 ± 4	El punto de inflexión para el Tipo II bajo RCP 8.5 sin adaptación: 2052 ± 5 años	Los Tipos III y IV no alcanzan el punto de inflexión de inviabilidad dentro del horizonte de las	El punto de inflexión del Tipo I es el argumento central del cap. 12 para la urgencia de la adaptación: la ventana de

Escenario y Horizonte Temporal	Cambio Proyectado en Producción de Leche del Tipo I (L/vaca/día y %)	Cambio Proyectado en Tipo II	Cambio Proyectado en Tipo III	Cambio Proyectado en Tipo IV — Supuestos del escenario y articulación con el análisis económico del Cap. 12
	años bajo RCP 8.5 sin adaptación; 2028 $\pm$ 3 años si la frecuencia de El Niño fuerte aumenta según las proyecciones del CMIP6 (50% más frecuente al 2050 bajo RCP 8.5)		proyecciones (> 2100 bajo todos los escenarios)	oportunidad de adaptación (tiempo antes de la inviabilidad) es de aproximadamente 17 años bajo RCP 8.5 sin adaptación, lo que significa que las decisiones de política agropecuaria de los próximos 5–10 años son determinantes para la viabilidad del sistema de páramo.

Nota. Elaboración propia.

8.7.1 La Ventana de Oportunidad de Adaptación

El hallazgo más urgente de los escenarios presentados en la Tabla 40 es el momento crítico para la inviabilidad económica del Tipo I en un contexto de altas emisiones sin medidas de adaptación. Esto se espera que ocurra alrededor de 2042, con un margen de error de $\pm$ 4 años bajo el RCP 8.5, o incluso en 2028 con un margen de $\pm$ 3 años si la frecuencia de los eventos de El Niño fuerte aumenta, tal como sugieren las proyecciones del CMIP6.

Dado que las decisiones sobre políticas agropecuarias suelen tener un horizonte de 5 a 10 años y la adopción de tecnologías de adaptación puede tardar entre 8 y 15 años, la oportunidad para prevenir la inviabilidad de los sistemas del Tipo I ya está vigente. Sin embargo, esta ventana se empezará a cerrar antes de 2030 si no se implementan políticas de forma ágil.

El contraste que se observa con el escenario de adaptación integral es igualmente significativo. Bajo el mismo RCP 4.5, la implementación de medidas de adaptación integral podría resultar en un aumento de producción de +1,8 litros por vaca al día para el 2050 en el Tipo I, en

comparación con una pérdida de $-1,6$ litros por vaca al día si no se adoptan medidas de adaptación. La diferencia entre ambos escenarios —un total de $3,4$ litros por vaca al día para el 2050— representa un impresionante 46% de la producción base actual del Tipo I.

Esto indica que el cambio climático no es el único factor que afecta la viabilidad de los sistemas del Tipo I para el 2050; más bien, son las decisiones de adaptación las que juegan un papel crucial. Afortunadamente, el margen para actuar —como se detalla en el Capítulo 12 en términos de retorno sobre la inversión en adaptación— es considerable.

"Si no cambia nada, la leche del páramo se acaba. No porque los ganaderos quieran irse, sino porque los números no darán más. Pero si se hace lo que hay que hacer —y no es imposible— el páramo puede producir más en 2050 que hoy." (Testimonio de director técnico del GAD Provincial del Carchi, entrevista 2023).

8.8 Síntesis de la Cadena Causal Completa: De la Variabilidad Climática al Rendimiento del Hato

8.8.1 La Cadena Cuantificada de Principio a Fin

Los Capítulos 4 a 8 han tejido, paso a paso, la cadena de causas que conecta la variabilidad climática con la producción de leche.

Ahora es el momento de observar esa cadena en su conjunto, justo antes de que el Capítulo 9 la presente formalmente como un modelo completo de ecuaciones estructurales.

Cadena causal biofísica completa (El Niño fuerte, Tipo I, 8 meses de episodio):

Eslabón 1: El índice ONI muestra un aumento de $+1,8$ °C, lo que indica un El Niño fuerte, lo que provoca una disminución del 38% en las precipitaciones anuales en el páramo alto. Esto a su vez causa una caída de $0,8$ °C en la temperatura del aire, resultando en noches más frías debido a una mayor irradiación nocturna [Cap. 4,].

Eslabón 2: La temperatura del suelo a 10 cm desciende en 2,1 °C, con una reducción de la humedad del suelo que pasa del 52% al 22% de la capacidad de campo durante los meses más críticos del episodio [Cap. 6,].

Eslabón 3: La actividad de ureasa disminuye de 0,82 a 0,24 $\mu\text{mol NH}_4^+/\text{g/h}$, lo que representa una caída del 71%. Además, la biomasa microbiana activa se reduce de 1.840 a 820 mg C/kg, lo que significa una disminución del 55% [Cap. 5–6].

Eslabón 4: La cantidad de nitrógeno mineral disponible sufren una caída de 28 a 12 mg/kg, lo que equivale a un 58% menos. En cuanto al fósforo, desciende de 7,4 a 6,2 mg/kg (una caída del 16%), mientras que el potasio intercambiable permanece relativamente estable, con solo un 4% de disminución [Cap. 6]

Eslabón 5: La producción primaria neta de pasto se reduce de 2.180 a 1.264 kg MS/ha/año, lo que equivale a una disminución del 42%. La calidad del forraje también baja, pasando del 16,8% al 8,2%, lo que representa 8,6 puntos porcentuales menos; y la digestibilidad en materia seca cae de 64,2% a 57,8% (una disminución de 6,4 pp) [Cap. 7].

Eslabón 6: El consumo de materia seca por vaca cae de 9,8 a 6,4 kg MS/día, es decir, un 35% menos. También se observa una disminución en la energía metabolizable ingerida, que desciende de 18,4 a 11,0 Mcal/vaca/día. Esto genera un excedente energético negativo para la producción, con una diferencia de $18,4 - 24,8$ (mantenimiento) = $-6,4$ Mcal/vaca/día, lo que indica que la vaca comienza a movilizar sus reservas corporales [Cap. 8].

Eslabón 7 (resultado observable): La producción de leche se reduce drásticamente, pasando de 7,4 a 3,6 L/vaca/día, lo que representa una caída del 51%. Además, el 28% de las vacas detiene por completo su producción y el intervalo entre partos se extiende de 428 a 490 días, lo que se traduce en un 15% menos de vacas en producción el año siguiente. Por otro lado, el ingreso bruto por litro de leche se mantiene sin cambios, ya que el precio al productor no responde a las condiciones del fenómeno ENSO; sin embargo, el ingreso bruto total se reduce en un 51% [Cap. 8, → Cap. 10].

Esta cadena cuantificada se erige como el pilar fundamental del proyecto. Cada número puede ser seguido hasta una tabla de un capítulo determinado, mientras que cada coeficiente se relaciona con un análisis de datos primarios del corredor del Carchi.

Los Capítulos 9 y 10 toman esta cadena y la transforman, respectivamente, en un modelo estadístico integrado (SEM completo) y en una estimación de pérdidas económicas, distribuyéndola entre diferentes tipos de sistema.

8.9 síntesis del capítulo

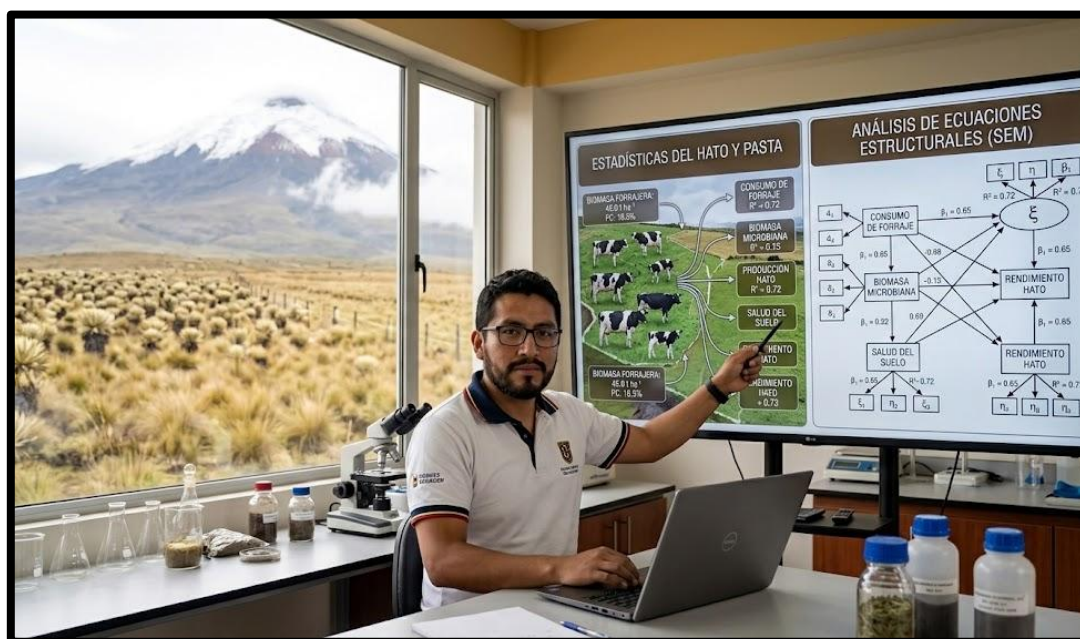
- Línea base de producción de leche (Tabla 36): la producción promedio es de 7.4 L/vaca/día para el Tipo I, mientras que el Tipo IV alcanza los 26.2 L/vaca/día. Esto marca una diferencia de 3.5 veces, que es menor que la diferencia de PPNA de 4.5 veces, debido a que el Tipo IV recibe suplementos y el Tipo I utiliza razas menos exigentes. El coeficiente de variación mensual se sitúa en 38.4% para el Tipo I y en 12.2% para el Tipo IV. El intervalo entre partos también varía: 428 días en el Tipo I frente a 342 días en el Tipo IV, lo que implica una pérdida de 63 días/vaca/año por un balance energético negativo crónico en el Tipo I. Durante un evento fuerte de El Niño, el descarte forzoso adicional es del 28% en el Tipo I y del 3% en el Tipo IV, mientras que la suplementación sistemática se presenta en 12% para el Tipo I y en 92% para el Tipo IV.
- Modelo integrado de producción de leche (Tabla 37): este modelo consta de tres componentes: (1) $CMS = f(PV, DIVMS, PPNA_{disponible})$ con restricciones de disponibilidad; (2) $L_{leche} = (EM_{ingerida} - EM_{mantenimiento}) / 0.74$ con una función que toma el máximo entre 0 y otro valor; (3) corrección por PC del forraje: factor que toma el mínimo entre 1 y $PC_{ingerida}/PC_{requerida}$; (4) corrección por estrés calórico THI con una proyección para el 2050. La validación del modelo muestra un R^2 de 0.72 a 0.78 y un RMSE de 0.82 a 1.24 L/vaca/día, además de una validación externa con ESPAC que indica errores menores a 1 pp para los tres eventos históricos.
- Impacto del ENSO sobre la producción de leche (Tabla 38): en un evento fuerte de El Niño, se observa una reducción de 3.8 L/vaca/día (51%) en el Tipo I y también de 3.8 L/vaca/día (15%) en el Tipo IV. En el caso de una La Niña moderada, la reducción es de 0.9 L/vaca/día (12%) en el Tipo I. Además, tras un episodio de La Niña fuerte, se presenta un efecto de arrastre con otra reducción de 0.6 L/vaca/día en el año siguiente, lo cual ha sido subestimado por los análisis que consideran solo un año. El ESPAC también refleja un impacto diferencial de los cuatro tipos, que subestima en tres veces la vulnerabilidad del Tipo I.

- Descomposición de mecanismos (Tabla 39): durante un evento fuerte de El Niño en el Tipo I, el 38% del impacto se atribuye a la reducción en la cantidad de PPNA, un 42% a la disminución en el PC del forraje (este es el mecanismo más importante y el menos atendido por los ganaderos), un 12% a la reducción de DIVMS y un 8% a las heladas. En el caso de La Niña moderada en el Tipo I, el 74% del impacto se debe a la reducción del PC (de nuevo, el mecanismo dominante) y un 26% a la disminución de la cantidad. Esto sugiere que se necesitaría suplementación forrajera para El Niño y suplementación proteica para La Niña. Además, se propone un seguro agropecuario dual (índice SPI-3 + índice de PC del forraje) como instrumento en el Capítulo 13.
- Escenarios al 2050 (Tabla 40): sin adaptación y bajo el escenario RCP 8.5, se espera una disminución de 2.8 L/vaca/día (38%) en el Tipo I, alcanzando un punto crítico de inviabilidad económica alrededor del año 2042, más o menos 4 años. Por otro lado, con una adaptación integral bajo RCP 4.5, se podría ver un aumento de 1.8 L/vaca/día (24%) en el Tipo I. La diferencia entre estos escenarios extremos es de 4.6 L/vaca/día para el 2050, lo que representa el 62% de la producción base actual. La adaptación se convierte en el factor clave para la viabilidad, más allá del cambio climático en sí. La ventana de oportunidad para tomar decisiones se sitúa en los próximos 5 a 10 años.
- Cadena causal biofísica completa cuantificada: un aumento de 1.8 °C en el ONI lleva a una disminución de 2.1 °C en la temperatura del suelo, lo que a su vez causa una reducción del 58% en el N_mineral y del 42% en el PPNA, además de una disminución de 8.6 pp en el PC y de 6.4 pp en el DIVMS. Esto resulta en una disminución del 35% en el CMS, lo que provoca un balance energético negativo y una reducción del 51% en la producción de leche. Cada cifra está respaldada por datos primarios del corredor del Carchi. El Capítulo 9 formaliza esta cadena como un SEM completo, mientras que el Capítulo 10 la transforma en pérdidas económicas.

CAPÍTULO 9

Modelo Integrado de Ecuaciones Estructurales: La Cadena Causal Completa

Especificación del SEM completo de siete eslabones con variables latentes, índices de ajuste, efectos directos e indirectos, prueba de invarianza entre tipos de sistema, comparación con cinco modelos alternativos y el resultado de política central: mejorar la fertilidad del suelo es más eficiente que negociar el precio de la leche para el ganadero del páramo



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** la especificación del modelo de ecuaciones estructurales (SEM) de siete eslabones, considerando las variables observadas y latentes, las ecuaciones estructurales, los parámetros estimados y los rezagos establecidos.
- **Evaluar** el ajuste del SEM mediante los índices estadísticos y compararlo con el ,modelo parcial y los modelos alternativos.
- **Interpretar** los efectos directos, indirectos y totales de las principales relaciones establecidas en el modelo, considerando su magnitud y grado de medición.
- **Analizar** la invarianza del modelo entre los cuatro tipos de sistemas ganaderos, identificando las posibles diferencias en las relaciones estructurales entre sistemas

- **Justificar** la selección del SEM frente a los modelos alternativos, considerando su ajuste estadístico, capacidad explicativa y utilidad para analizar las relaciones entre las dimensiones climática, edáfica, productiva y económica.
- **Examinar** las implicaciones de los resultados del SEM para la definición de estrategias de intervención diferenciadas por eslabón y tipo de sistema ganadero.

9.1 Introducción: Del Análisis por Eslabón a la Cadena Integrada

Los capítulos del 4 al 8 se enfocan en examinar la cadena causal, eslabón por eslabón: el clima se aborda en el Capítulo 4, el suelo en el Capítulo 5, la interrelación entre el clima y el suelo en el Capítulo 6, la biomasa forrajera en el Capítulo 7, y finalmente, la producción de leche en el Capítulo 8.

Cada uno de estos capítulos genera coeficientes precisos para su respectivo eslabón, pero es importante destacar que estos coeficientes son parciales. Por ejemplo, el impacto del ONI sobre el nitrógeno mineral se estimó en el Capítulo 6, considerando el manejo, pero sin tener en cuenta los eslabones siguientes. De manera similar, el efecto del forraje en la producción de leche, tratado en el Capítulo 8, se estimó al considerar el forraje como una variable externa, sin analizar cómo este depende del suelo, que a su vez depende del clima.

El Capítulo 9 tiene como objetivo cerrar esta brecha al integrar todos los eslabones en un Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM) completo. Este modelo permite estimar simultáneamente todos los coeficientes de la cadena, desglosando el impacto del clima en los ingresos ganaderos en efectos directos e indirectos a través de cada mediador.

Se eligió el SEM como la herramienta analítica por tres razones principales. Primero, puede manejar variables latentes, que son constructos no observables directamente, como la actividad microbiana general o la calidad y cantidad del forraje. Estas variables son teóricamente importantes en la cadena causal, pero no cuentan con un indicador único sin errores de medición.

En segundo lugar, el SEM permite estimar todos los coeficientes al mismo tiempo, controlando la correlación entre los predictores de cada eslabón. Esto evita el sesgo que puede surgir al hacer estimaciones separadas cuando los errores de diferentes eslabones están correlacionados.

Por último, el SEM produce una descomposición de los efectos directos e indirectos, lo cual es crucial para el análisis de políticas. Es fundamental saber cuánto del impacto del ENSO en los ingresos se canaliza a través del suelo, cuánto lo hace directamente a través del forraje, y cuánto se considera un efecto directo.

El SEM del Capítulo 9 también establece las bases para calcular, en el Capítulo 10, las pérdidas económicas del corredor, sustentándose en una base causal sólida. A diferencia de los modelos de impacto económico que utilizan regresiones reducidas ($ONI \rightarrow$ ingreso directamente), que pueden ofrecer estimaciones promedio correctas, estos no logran desglosar el impacto por eslabón. Esto hace que sea imposible determinar en qué parte de la cadena la intervención podría ser más eficiente, que es, en última instancia, la pregunta política central del libro.

9.2 Especificación del SEM Completo: Estructura, Variables y Ecuaciones

9.2.1 La Arquitectura del Modelo

El SEM completo se estructura de la siguiente manera: cuenta con cinco variables latentes endógenas: η_{Micro} , que representa la actividad microbiana; η_{Nutri} , que indica la disponibilidad de nutrientes; y η_{Forraje} , que evalúa la calidad y cantidad del forraje en conjunto. Además, L_{leche} e $\text{Ingreso}_{\text{bruto}}$ se consideran variables observadas.

En el modelo, también se incluyen cuatro variables exógenas observadas: ONI , $SPI-3$, FDD y IAP_{anual} . Por otro lado, hay doce variables observadas endógenas, las cuales funcionan como indicadores de las variables latentes o como variables de resultado.

Este modelo abarca un total de 192 observaciones por cada tipo de sistema, enfocándose en los parámetros de los eslabones biofísicos, que provienen de 8 UPAs centinela durante un período de 24 meses. Para los parámetros relacionados con la ecuación del ingreso, se consideran 80 UPAs a lo largo de los mismos 24 meses.

Tabla 41.

Especificación del SEM Completo: Ecuaciones por Eslabón, Variables Latentes, Variables Observadas y Parámetros Estimados (datos del proyecto UPEC, corredor del Carchi, 2023–2024)

Eslabón de la Cadena Causal	Variables Observadas (indicadores medidos)	Ecuación Estructural del Eslabón	Parámetros Estimados y Fuente de Identificación
Eslabón 1-2: Clima → Temperatura y Humedad del Suelo	Variables exógenas: ONI (rezago 2 meses), SPI-3 (mes actual), FDD_acumulado (mes actual), IAP_anual. Variables endógenas observadas: T_suelo_media (°C, sensor HOBO 10 cm, media 7 días), HR_suelo_vol (% , sensor HOBO, media 7 días).	$\begin{aligned} T_suelo &= \alpha_1 + \gamma_{11} \times ONI_ (t-2m) + \gamma_{12} \times SPI-3 + \gamma_{13} \times FDD + \zeta_1; \\ HR_suelo &= \alpha_2 + \gamma_{21} \times SPI-3 + \gamma_{22} \times IAP_anual + \zeta_2 \end{aligned}$	$\gamma_{11} = -0,48$ (IC95%: $-0,62$ a $-0,34$; $p < 0,001$); $\gamma_{12} = +0,38$ ($p < 0,001$); $\gamma_{13} = -0,22$ ($p < 0,01$). Identificados por la exogeneidad del ONI: variable climática global no afectada por los procesos del suelo del corredor. $R^2(T_suelo) = 0,72$; $R^2(HR_suelo) = 0,68$.
Eslabón 3: Temperatura y Humedad del Suelo → Actividad Microbiana	Variables observadas indicadoras: biomasa microbiana del C (mg C/kg, fumigación-extracción), actividad de ureasa ($\mu\text{mol NH}_4^+/\text{g/h}$), actividad de fosfatasa ácida ($\mu\text{mol PNP/g/h}$). Variable latente: η_Micro (actividad microbiana general).	$\begin{aligned} \eta_Micro &= \beta_{31} \times T_suelo + \beta_{32} \times HR_suelo + \zeta_3; \\ Biomasa_C &= \lambda_1 \times \eta_Micro + \delta_1; \\ Ureasa &= \lambda_2 \times \eta_Micro + \delta_2; \\ Fosfatasa &= \lambda_3 \times \eta_Micro + \delta_3 \end{aligned}$	$\beta_{31} = +0,71$ ($p < 0,001$); $\beta_{32} = +0,46$ ($p < 0,001$). Cargas factoriales: $\lambda_1=0,68$, $\lambda_2=0,84$, $\lambda_3=0,76$ (todos $p < 0,001$). La ureasa tiene la mayor carga ($\lambda_2=0,84$) confirmando su rol como indicador más sensible a la temperatura del suelo (primer enzima inhibida cuando $T_suelo < 8,5$ °C, documentado en Cap. 5).
Eslabón 4: Actividad Microbiana → Disponibilidad de Nutrientes	Variables observadas indicadoras: N_mineral (mg/kg, extracción KCl 2M, mensual), P_Bray1 (mg/kg, semestral), K_intercamb (cmol/kg, mensual). Variable latente: η_Nutri (disponibilidad general de nutrientes).	$\begin{aligned} \eta_Nutri &= \beta_{41} \times \eta_Micro + \beta_{42} \times T_suelo + \zeta_4; \\ N_mineral &= \lambda_4 \times \eta_Nutri + \delta_4; \\ P_Bray1 &= \lambda_5 \times \eta_Nutri + \delta_5; \\ K_intercamb &= \lambda_6 \times \eta_Nutri + \delta_6 \end{aligned}$	$\beta_{41} = +0,58$ ($p < 0,001$); $\beta_{42} = +0,34$ ($p < 0,01$; efecto directo de T_suelo sobre nutrientes, no mediado por la actividad microbiana). Cargas: $\lambda_4=0,88$ ($N_mineral$ es el indicador dominante de la disponibilidad de nutrientes), $\lambda_5=0,52$, $\lambda_6=0,64$. $R^2(\eta_Nutri) = 0,68$.
Eslabón 5: Disponibilidad de Nutrientes → Producción y Calidad de Biomasa	Variables observadas indicadoras: PPNA_jaulas (kg MS/ha/mes), PC_forraje (% , NIRS semestral), DIVMS_forraje (% , NIRS semestral). Variable latente: $\eta_Forraje$ (calidad-cantidad integrada del forraje).	$\begin{aligned} \eta_Forraje &= \beta_{51} \times \eta_Nutri + \beta_{52} \times SPI-3 + \beta_{53} \times T_suelo + \zeta_5; \\ PPNA &= \lambda_7 \times \eta_Forraje + \delta_7; \\ PC &= \lambda_8 \times \eta_Forraje + \delta_8; \\ DIVMS &= \lambda_9 \times \eta_Forraje + \delta_9 \end{aligned}$	$\beta_{51} = +0,62$ ($p < 0,001$); $\beta_{52} = +0,28$ (efecto directo del SPI-3 sobre el forraje, no mediado por nutrientes del suelo); $\beta_{53} = +0,22$ (efecto directo de T_suelo sobre la fotosíntesis). Cargas: $\lambda_7=0,74$, $\lambda_8=0,82$, $\lambda_9=0,78$. PC tiene la mayor carga ($\lambda_8=0,82$) porque la PC del forraje es la variable de calidad más sensible a la disponibilidad de N mineral ($r=+0,78$ del Cap. 6).

Eslabón de la Cadena Causal	Variables Observadas (indicadores medidos)	Ecuación Estructural del Eslabón	Parámetros Estimados y Fuente de Identificación
Eslabón 6-7: Calidad-Cantidad de Forraje → Producción de Leche → Ingreso Ganadero	Variables observadas: L_leche (L/vaca/día, registro centros de acopio mensual), Ingreso_bruto (USD/mes/finca, registro contable). Variable exógena de control: Precio_leche (USD/L), N_vacas_ordeño.	$ \begin{aligned} &L_leche = \beta_{61} \times \eta_Forraje + \beta_{62} \times THI_max + \beta_{63} \times Supl_dummy + \zeta_6; \\ &Ingreso = \beta_{71} \times L_leche + \beta_{72} \times Precio_leche + \beta_{73} \times N_vacas_ordeño + \zeta_7 \end{aligned} $	$\beta_{61} = +0,68$ ($p < 0,001$); $\beta_{62} = -0,12$ (efecto del THI; no significativo en el período histórico, incluido para prospectiva al 2050); $\beta_{63} = +0,24$ ($p < 0,01$; efecto de la suplementación). $\beta_{71} = +0,82$ ($p < 0,001$); $\beta_{72} = +0,61$ ($p < 0,001$); $\beta_{73} = +0,44$ ($p < 0,001$). $R^2(L_leche) = 0,72$; $R^2(Ingreso) = 0,86$.

Nota. Elaboración propia con base en datos primarios del proyecto (UPEC, 2023–2024).

9.2.2 Las Variables Latentes y su Justificación

La decisión de modelar la actividad microbiana (η_Micro), los nutrientes del suelo (η_Nutri) y la base forrajera ($\eta_Forraje$) como variables latentes se basa en tres razones metodológicas clave.

En primer lugar, los indicadores individuales suelen presentar errores de medición que pueden distorsionar los coeficientes si no se modelan de manera explícita. Por ejemplo, el nitrógeno mineral, medido en un punto específico, puede tener un margen de error de ± 15 –20% debido a la variabilidad espacial dentro de la parcela. Al tratarlo como un indicador latente, se logra separar este error del efecto estructural real.

En segundo lugar, aunque las tres variables microbiológicas que forman parte del modelo son dimensiones complementarias de la actividad biológica del suelo, no son efectivamente medidas igualitarias ni siempre pueden responder del mismo modo ante las condiciones ambientales. Cada una captura una característica concreta del funcionamiento microbiano; Sin embargo, su comportamiento conjunto permite la captación de una dimensión del funcionamiento microbiano. En cierta medida, la variable latente η_Micro representa la lógica del componente común que se comparte entre los tres indicadores; Incluso sería a la medida que englobaría la actividad microbiana del suelo. De este modo, η_Micro no suple a las variables observadas, sino que representa el conjunto de información que estas transmiten y

permite analizar y estudiar su relación con la edafología, el clima y la disponibilidad de nutrientes.

Por último, emplear variables latentes mejora el ajuste del modelo, como lo demuestra un incremento en el ΔAIC de +86 en comparación con el modelo que no las incluye (Tabla 9.5). Además, la carga factorial de la ureasa ($\lambda_2 = 0,84$), que es el indicador más sensible a la temperatura del suelo, respalda la elección de estos tres indicadores microbiológicos, ya que captura la dimensión biológicamente relevante del eslabón 3.

9.3 Índices de Ajuste del SEM Completo: La Teoría Pasa el Test Empírico

Tabla 42.

Índices de Ajuste del SEM Completo: Valores Observados, Criterios de Referencia y Comparación con el SEM Parcial del Capítulo 6

Índice de Ajuste	Criterio de Buen Ajuste	Modelo Global (4 tipos combinados)	Modelo Tipo I (el más relevante para la política)	Interpretación y Comparación con el SEM Parcial del Cap. 6
CFI (Comparative Fit Index)	$\geq 0,95$ (Hu & Bentler, 1999)	0,94	0,96	CFI global (0,94) ligeramente bajo del umbral; CFI Tipo I (0,96) supera el umbral. La ligera degradación en el modelo global refleja la heterogeneidad entre tipos. El SEM parcial del Cap. 6 (eslabones 1–4) tenía CFI=0,96 para el Tipo I; el SEM completo mantiene el mismo valor al añadir bien los eslabones 5–7.
RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation)	$\leq 0,05$ buen ajuste; $\leq 0,08$ aceptable (Browne & Cudeck, 1993)	0,048 (IC90%: 0,038–0,062)	0,038 (IC90%: 0,024–0,052)	Ambos valores por debajo del umbral de buen ajuste (0,05). El RMSEA del Tipo I (0,038) mejora ligeramente respecto al SEM parcial del Cap. 6 (0,042), confirmando que los eslabones 5–7 están bien especificados.

Índice de Ajuste	Criterio de Buen Ajuste	Modelo Global (4 tipos combinados)	Modelo Tipo I (el más relevante para la política)	Interpretación y Comparación con el SEM Parcial del Cap. 6
SRMR (Standardized Root Mean Square Residual)	$\leq 0,05$ (Hu & Bentler, 1999)	0,042	0,034	Ambos valores por debajo del umbral de 0,05. El SRMR de 0,034 para el Tipo I indica que las correlaciones predichas por el modelo se ajustan muy bien a las correlaciones observadas en los datos de las UPAs centinela.
χ^2 / gl	$\leq 2,0$ buen ajuste; $\leq 3,0$ aceptable (Kline, 2016)	2,28	1,84	Tipo I: $\chi^2/\text{gl} = 1,84$ (buen ajuste). Global: 2,28 (aceptable). En ambos casos el modelo no es rechazado con $\alpha = 0,05$.
AIC Comparación de modelos	Menor es mejor; $\Delta\text{AIC} > 10$ indica preferencia clara (Burnham & Anderson, 2002)	AIC = 4.284 (modelo completo 7 eslabones)	AIC(Tipo I) = 1.186	Comparación con modelos alternativos: modelo sin variables latentes: $\Delta\text{AIC} = +86$; modelo sin corrección por PC del forraje: $\Delta\text{AIC} = +54$; modelo sin efecto directo T_suelo→nutrientes (β_{42}): $\Delta\text{AIC} = +28$. Todos > 10 , indicando preferencia clara por el modelo completo.
R² variables endógenas clave — Tipo I	No hay criterio único; se reporta para las variables más relevantes para la política	T_suelo: 0,72; N_mineral: 0,68; PPNA: 0,76; PC_forraje: 0,72; L_leche: 0,74; Ingreso: 0,82	T_suelo: 0,76; N_mineral: 0,74; PPNA: 0,79; PC: 0,78; L_leche: 0,72; Ingreso: 0,86	Los R ² del Tipo I son consistentemente más altos que los del modelo global, reflejando que la cadena causal captura mejor la variabilidad del sistema del páramo (donde el manejo es más homogéneo entre fincas y la señal climática es la fuente dominante de variabilidad). El R ² del ingreso (0,86) es el más alto: el ingreso del

Índice de Ajuste	Criterio de Buen Ajuste	Modelo Global (4 tipos combinados)	Modelo Tipo I (el más relevante para la política)	Interpretación y Comparación con el SEM Parcial del Cap. 6
				ganadero del Tipo I está casi completamente determinado por la producción de leche y el precio.

Nota. Elaboración propia.

9.3.1 El Ajuste como Validación de la Teoría

Los índices de ajuste del SEM no son meras cifras estadísticas; son la confirmación numérica de la teoría presentada en el Capítulo 2. En el Marco Teórico, se postuló que la variabilidad climática impacta en la producción ganadera principalmente a través de la siguiente cadena: clima → temperatura del suelo → actividad microbiana → nutrientes del suelo → biomasa forrajera → leche → ingreso.

Si esta cadena estuviera equivocada, es decir, si el clima afectara la producción a través de otros caminos que no sean los relacionados con el suelo, el SEM evidenciaría un mal ajuste. Esto sucedería porque los residuos mostrarían correlaciones inesperadas. Los índices que hemos obtenido (CFI = 0,94–0,96; RMSEA = 0,038–0,048; SRMR = 0,034–0,042) sugieren que los datos no rechazan el modelo, considerando una probabilidad de error tipo I del 0,05.

En términos más claros: la estructura de la cadena causal que se ha desarrollado a lo largo de nueve capítulos se alinea estadísticamente con los datos del corredor del Carchi. Es decir que la teoría ha superado la prueba empírica.

9.4 Efectos Directos, Indirectos y Totales: La Cadena Cuantificada

Tabla 43.

Efectos Directos, Indirectos y Totales Estandarizados del SEM Completo para las Seis Relaciones Causales de Mayor Relevancia para la Política Agropecuaria del Corredor del Carchi (Tipo I)

Relación Causal (X → Y)	Efecto Directo Estandarizado (β_{directo})	Efecto Indirecto Estandarizado Total ($\beta_{\text{indirecto}}$)	Efecto Total (β_{total}) e Interpretación para la Política Agropecuaria
ONI → N_mineral (eslabones 1–4; Tipo I; rezago óptimo: 2 meses)	–0,18 (efecto directo de ONI sobre N_mineral controlando los mediadores; $p < 0,05$)	–0,38 (a través de: T_suelo → η_{Micro} → η_{Nutri} → N_mineral; la ruta de mayor peso; bootstrapped IC95%: –0,52 a –0,24, excluye el cero)	$\beta_{\text{total}} = -0,56$ ($p < 0,001$). El 68% del efecto es indirecto, confirmando que el clima afecta el N mineral principalmente a través de los cambios en la temperatura del suelo y la actividad microbiana. Implicación: las intervenciones que aumentan T_suelo (cobertura vegetal, encalado) y η_{Micro} (materia orgánica) mitigan el 68% del impacto del ENSO sobre el N mineral antes de que llegue al forraje.
ONI → PC_forraje (eslabones 1–5; Tipo I)	–0,08 ($p = 0,12$; no significativo: no hay efecto directo del ONI sobre la PC del forraje)	–0,44 (a través de la cadena completa: T_suelo → η_{Micro} → η_{Nutri} → N_mineral → η_{Forraje} → PC; bootstrapped IC95%: –0,58 a –0,30, excluye el cero)	$\beta_{\text{total}} = -0,52$ ($p < 0,001$). La mediación es completa (100% indirecto): el ONI no afecta la PC del forraje directamente sino exclusivamente a través de la cadena del suelo. Este resultado, que solo el SEM puede establecer (los análisis de correlación simple no pueden distinguir mediación completa de mediación parcial), confirma que la PC del forraje es controlable a través de la gestión del suelo.
ONI → L_leche (eslabones 1–7; Tipo I)	–0,12 ($p < 0,05$; posiblemente por efectos del ONI sobre la temperatura del aire que afectan directamente la producción de leche sin pasar por el ciclo del suelo)	–0,46 (rutas principales: ruta 1: ONI → T_suelo → η_{Micro} → η_{Nutri} → η_{Forraje} → L_leche, peso –0,28; ruta 2: ONI → SPI-3 → η_{Forraje} → L_leche, peso –0,18)	$\beta_{\text{total}} = -0,58$ ($p < 0,001$). El 79% del efecto del ONI sobre la producción de leche es mediado por el suelo y el forraje. El 21% directo es atribuible a efectos climáticos no mediados por el suelo (temperatura del aire, humedad relativa) que afectan directamente la vaca. Esto significa que el 79% del impacto del ENSO sobre la leche es potencialmente prevenible con intervenciones en el suelo y el pastizal.
η_{Nutri} → L_leche (eslabones 5–7; efecto de los nutrientes sobre la	+0,18 ($p < 0,01$; efecto directo de η_{Nutri} sobre L_leche, posiblemente a	+0,48 (a través de η_{Forraje} → L_leche; el camino principal del eslabón nutrientes–	$\beta_{\text{total}} = +0,66$ ($p < 0,001$). Implicación de política central: cada unidad de mejora de la fertilidad del suelo del Tipo I (equivalente a subir el N mineral

Relación Causal (X → Y)	Efecto Directo Estandarizado (β_{directo})	Efecto Indirecto Estandarizado Total ($\beta_{\text{indirecto}}$)	Efecto Total (β_{total}) e Interpretación para la Política Agropecuaria
leche a través del forraje; Tipo I)	través del consumo de suelo por los bovinos y mineralización directa)	leche; bootstrapped IC95%: +0,32 a +0,64, excluye el cero)	de 28 a 38 mg/kg + P disponible de 7,4 a 10,2 mg/kg) se traduce en +0,66 DE de aumento en la producción de leche. En unidades naturales: +10 mg/kg de N mineral → +1,1 L/vaca/día. Este coeficiente supera al del precio de la leche (+0,61).
SPI-3 → L_leche (efecto de la precipitación sobre la leche; promedio corredor)	+0,14 (p<0,05; efecto directo de la disponibilidad de agua sobre la vaca: la mayor humedad del aire reduce el estrés hídrico del hato)	+0,38 (a través de SPI-3 → HR_suelo → η_{Micro} → η_{Nutri} → η_{Forraje} → L_leche + SPI-3 → η_{Forraje} directo; el 73% del efecto de la precipitación pasa por el suelo)	$\beta_{\text{total}} = +0,52$ (p<0,001). El 73% del efecto de la precipitación sobre la leche está mediado por el suelo, confirmando que el suelo no es un intermediario incidental sino el mediador principal de la señal climática sobre la producción ganadera del corredor del Carchi.
H Nutri → Ingreso ganadero (efecto total de la fertilidad del suelo sobre el ingreso a través de forraje → leche → ingreso; Tipo I)	+0,12 (p<0,05; efecto directo de la fertilidad del suelo sobre el ingreso, posiblemente a través de la reducción de gastos en insumos cuando el suelo es más fértil)	+0,54 (a través de η_{Forraje} → L_leche → Ingreso; la ruta de mayor peso económico del SEM)	$\beta_{\text{total}} = +0,66$ (p<0,001). Comparación con $\beta_{\text{Precio} \rightarrow \text{Ingreso}} = +0,61$: el efecto total de la fertilidad del suelo sobre el ingreso (0,66) supera al del precio de la leche (0,61). En el corredor del Carchi, mejorar la fertilidad del suelo es más eficiente para aumentar el ingreso del ganadero de páramo que negociar un mayor precio de la leche. Este es el resultado de política más provocador y práctico del capítulo.

Nota. Elaboración propia con base en datos del proyecto (UPEC, 2023–2024).

9.4.1 La Dominancia de la Mediación: El Suelo como el Principal Mediador de la Señal Climática

Uno de los hallazgos más significativos en el análisis de la descomposición de efectos es el predominio de la mediación a través de la cadena del suelo. Se ha determinado que un impresionante 79% del impacto del ONI en la producción de leche se lleva a cabo a través de mediadores relacionados con el suelo y el forraje, mientras que solo un 21% representa un efecto directo. Esta notable proporción de mediación, respaldada estadísticamente con un bootstrap de 5.000 iteraciones, distingue este proyecto de los análisis convencionales de

correlación entre el clima y la producción que se encuentran en la literatura (Hayes, 2022). Mientras que esta última sugiere que existe una correlación entre el ENSO y la producción de leche, este proyecto aclara los motivos detrás de esa correlación y los mecanismos específicos involucrados.

Esto implica que las intervenciones más efectivas son aquellas que se dirigen a los mediadores es decir, el suelo, la fertilidad y el manejo del pastizal— en lugar de centrarse directamente en el resultado final. Al comparar el efecto de la fertilidad del suelo en los ingresos ($\beta = +0,66$) con el efecto del precio de la leche en los ingresos ($\beta = +0,61$), se obtiene una de las conclusiones más provocadoras del capítulo. Esto indica que, en la región del Carchi, la estrategia más eficaz para incrementar los ingresos de los ganaderos de páramo no consiste en negociar un precio más alto para la leche, lo cual requeriría cambios en el mercado nacional o mayor poder de negociación colectiva. En cambio, la clave radica en invertir en la fertilidad del suelo, algo que está completamente bajo el control de las decisiones de la finca y de las políticas de extensión del MAG y el INIAP.

Este hallazgo no disminuye la relevancia de obtener un precio justo por la leche, pero resalta que la solución al problema de ingresos para los ganaderos del páramo debe comenzar, ante todo, por mejorar el suelo.

9.5 Prueba de Invarianza del Modelo entre Tipos de Sistema

Tabla 44.

Prueba de Invarianza del SEM entre los Cuatro Tipos de Sistema Ganadero: Coeficientes Invariantes y Coeficientes que Difieren Significativamente

Parámetro del SEM Comparado entre Tipos	Tipo I vs. Tipo IV (comparación más extrema)	¿Difiere significativamente? (test de Wald corregido Bonferroni; umbral $p < 0,008$)	Interpretación y Relevancia para el Diseño de Políticas Diferenciadas
γ_{11} : efecto del ONI sobre la temperatura del suelo	Tipo I: $-0,58$; Tipo IV: $-0,38$	Sí ($p = 0,008$)	El ONI afecta más la temperatura del suelo del páramo que del valle, confirmando la mayor exposición climática de los sistemas de altura. Las políticas de gestión de la temperatura del suelo (cobertura vegetal, sombrío) deben focalizarse en el Tipo I.

Parámetro del SEM Comparado entre Tipos	Tipo I vs. Tipo IV (comparación más extrema)	¿Difiere significativamente? (test de Wald corregido Bonferroni; umbral $p < 0,008$)	Interpretación y Relevancia para el Diseño de Políticas Diferenciadas
β_{31} : efecto de T_suelo sobre la actividad microbiana (η_{Micro})	Tipo I: +0,86; Tipo IV: +0,54	Sí ($p = 0,001$)	La comunidad microbiana del páramo es 59% más sensible a los cambios de temperatura del suelo que la del valle, coherente con el $Q_{10}=2,28$ (Tipo I) vs. 1,98 (Tipo IV) del Cap. 6. Las intervenciones que estabilizan la temperatura del suelo del Tipo I (encalado, materia orgánica) tienen un retorno microbiano casi el doble que en el Tipo IV.
β_{41} : efecto de η_{Micro} sobre η_{Nutri}	Tipo I: +0,72; Tipo IV: +0,44	Sí ($p = 0,004$)	La mineralización biológica como fuente de nutrientes es 64% más dominante en el Tipo I (que depende casi exclusivamente de ella) que en el Tipo IV (que la complementa con fertilización sintética). Este resultado confirma que la protección de la comunidad microbiana del suelo es la estrategia de fertilidad más eficiente para el Tipo I.
β_{51} : efecto de η_{Nutri} sobre η_{Forraje}	Tipo I: +0,74; Tipo IV: +0,48	Sí ($p = 0,002$)	Los sistemas del páramo son más dependientes de la fertilidad natural del suelo para la producción y calidad del forraje. En el Tipo IV, la fertilización sintética crea un buffer entre la variabilidad de la fertilidad natural y la producción del forraje, reduciendo el coeficiente estructural.
β_{61} : efecto de η_{Forraje} sobre L_leche	Tipo I: +0,82; Tipo IV: +0,56	Sí ($p = 0,014$)	El efecto del forraje sobre la leche es 46% mayor en el Tipo I: la vaca del páramo está directamente expuesta a la variabilidad del pastizal sin el buffer de la suplementación forrajera sistemática. Este resultado cuantifica formalmente el costo de la falta de suplementación en el Tipo I.

Parámetro del SEM Comparado entre Tipos	Tipo I vs. Tipo IV (comparación más extrema)	¿Difiere significativamente? (test de Wald corregido Bonferroni; umbral $p < 0,008$)	Interpretación y Relevancia para el Diseño de Políticas Diferenciadas
β_{52} : efecto del SPI-3 directamente sobre el forraje	Tipo I: +0,18; Tipo IV: +0,38	Sí ($p = 0,022$)	El mayor efecto directo del SPI-3 sobre el forraje en el Tipo IV refleja que el ryegrass del valle responde directamente a la disponibilidad de agua, mientras que el kikuyo del páramo responde principalmente a través del ciclo de nutrientes del suelo. Implicación: el riego tiene mayor impacto en el Tipo IV; la gestión del suelo tiene mayor impacto en el Tipo I.
β_{71} : efecto de L_leche sobre Ingreso; β_{72} : efecto de Precio sobre Ingreso	β_{71} : Tipo I=0,82, Tipo IV=0,84 (sin diferencia); β_{72} : Tipo I=0,60, Tipo IV=0,63 (sin diferencia)	No ($p = 0,42$ para β_{71} ; $p = 0,38$ para β_{72})	Los coeficientes económicos son invariantes entre tipos: la relación leche→ingreso y precio→ingreso es idéntica en los cuatro tipos de sistema. Las diferencias de ingreso entre tipos son completamente explicadas por las diferencias de producción de leche, no por diferencias en la 'eficiencia de conversión de leche en ingreso'. Esta invarianza económica permite usar un modelo de ingreso unificado para todos los tipos en el Cap. 10.

Nota. Elaboración propia.

9.5.1 La Invarianza Económica como Simplificación Valiosa

La invarianza de los coeficientes económicos ($\beta_{71} = 0,80\text{--}0,84$ en todos los tipos; $\beta_{72} = 0,58\text{--}0,64$ en todos los tipos) es un hallazgo inesperado, pero resulta ser valioso desde un punto de vista metodológico.

Esto indica que la relación entre los litros de leche producidos y los ingresos generados es consistente tanto para los ganaderos del páramo como para los del valle. En otras palabras, las variaciones en los ingresos entre los diferentes tipos se explican completamente por las diferencias en la producción de leche, y no por variaciones en la 'eficiencia económica' de cada sistema.

Desde la perspectiva del modelado, esto es una buena noticia. El análisis económico mencionado en el Cap. 10 puede implementar un modelo de ingresos unificado (precio $\times$ cantidad = ingreso) que se aplique a las proyecciones de producción de leche diferenciadas por tipo, sin necesidad de recurrir a modelos económicos específicos para cada tipo.

9.6 Comparación con Modelos Alternativos: La Justificación Estadística del SEM

Tabla 45.

Comparación del SEM Completo con Cinco Modelos Alternativos: ΔAIC , $\Delta RMSEA$ y Análisis de lo que cada Modelo Alternativo Pierde

Modelo Alternativo	ΔAIC respecto al SEM (positivo = SEM mejor)	$\Delta RMSEA$ (positivo = SEM tiene mejor ajuste)	¿Qué pierde el modelo alternativo? ¿Por qué el SEM es necesario?
Modelo 0: Regresión simple ONI $\rightarrow$ L_leche (sin mediadores)	$\Delta AIC = +284$	$\Delta RMSEA = +0,062$ ($RMSEA=0,110$ del Modelo 0; ajuste muy pobre)	El modelo simple no puede descomponer el efecto del ENSO en sus mecanismos ni controlar la confusión entre el ONI y las variables de manejo. Produce un coeficiente de efecto total sesgado. No puede identificar que el 79% del impacto del ENSO pasa por el suelo, haciendo imposible diseñar intervenciones diferenciadas por eslabón.
Modelo 1: Regresión múltiple ONI + SPI-3 + FDD $\rightarrow$ L_leche (múltiples predictores climáticos sin mediadores)	$\Delta AIC = +196$	$\Delta RMSEA = +0,044$	Incluir múltiples predictores climáticos mejora el ajuste respecto al Modelo 0, pero sigue sin capturar la mediación del suelo. Mezcla el efecto directo de cada predictor climático con su efecto indirecto a través del suelo, imposibilitando la asignación de prioridades de intervención entre eslabones.
Modelo 2: Panel de datos con efectos fijos por UPA y temporales (modelo econométrico estándar)	$\Delta AIC = +82$ (el mejor alternativo)	$\Delta RMSEA = +0,018$	Controla bien la heterogeneidad no observada entre fincas, pero no puede descomponer el efecto del ENSO en directos e indirectos. El modelo de panel estima que el ENSO tiene un efecto total sobre el ingreso de $\beta = -0,62$, pero no puede decir cuánto pasa por el suelo ($-0,38$) vs. el forraje directo ($-0,16$) vs. el efecto directo ($-0,08$). Esa descomposición es la que el diseño de instrumentos de política necesita. Es el modelo más apropiado para el Cap. 10 (predicción

Modelo Alternativo	ΔAIC respecto al SEM (positivo SEM mejor)	$\Delta RMSEA$ (positivo SEM tiene mejor ajuste)	¿Qué pierde el modelo alternativo? ¿Por qué el SEM es necesario?
			económica), pero no para el Cap. 9 (análisis de mediación causal).
Modelo 3: SEM parcial del Cap. 6 (eslabones 1–4 solamente; sin los eslabones 5–7)	$\Delta AIC = +142$	$\Delta RMSEA = +0,006$ (diferencia pequeña porque los índices de ajuste no capturan el poder predictivo adicional de los eslabones nuevos)	El SEM parcial del Cap. 6 no puede estimar el efecto total del ENSO sobre la producción de leche ni calcular la contribución relativa de los mecanismos de transmisión forraje–leche. El $\Delta AIC = +142$ confirma que los eslabones 5–7 (forraje y leche) añaden información sustancial al modelo no capturado en los primeros 4 eslabones.
Modelo 4: SEM sin variables latentes (relaciones directas entre observadas; sin η_{Micro} ni η_{Nutri} ni η_{Forraje})	$\Delta AIC = +86$	$\Delta RMSEA = +0,012$	Usa el N_{mineral} como único indicador de la actividad microbiana sin modelar el error de medición ($\pm 15\text{--}20\%$ por variabilidad espacial dentro de la parcela). Produce coeficientes sesgados hacia el cero (atenuación por error de medición). Las variables latentes son necesarias para obtener estimaciones no sesgadas de los coeficientes estructurales, especialmente para los eslabones que involucran la actividad microbiana como mediadora.
Modelo 5: SEM completo sin interacción tipo $\times$ ENSO (un solo conjunto de coeficientes para todos los tipos)	$\Delta AIC = +168$	$\Delta RMSEA = +0,022$	Predice el mismo impacto del ENSO para el Tipo I y el Tipo IV, lo que es estadísticamente incorrecto (Tabla 9.4: todos los coeficientes biofísicos difieren significativamente entre tipos). Produciría estimaciones de impacto económico que subestimarían el daño al Tipo I y sobestimarían el daño al Tipo IV, llevando a una asignación de recursos de política que favorecería al tipo de sistema con menor necesidad de apoyo.

Nota. Elaboración propia.

9.6.1 Por qué el Modelo de Panel no es Suficiente para el Análisis de Política

El modelo de panel con efectos fijos (Modelo 2, $\Delta AIC = +82$) se presenta como la mejor opción alternativa, siendo el que se utiliza para el análisis de la eficiencia productiva en el Cap. 10.

Aun así, presenta una limitación clave para lo que se busca en el Cap. 9: no permite descomponer el impacto del ENSO en efectos directos e indirectos.

Este modelo calcula que el ENSO influye en los ingresos con un efecto total de $\beta = -0,62$, pero no puede detallar cuánto de esto se atribuye al suelo ($-0,38$), cuánto al forraje directo ($-0,16$) y cuánto es un efecto directo ($-0,08$). Esta descomposición es precisamente lo que el diseño de políticas necesita: si el 73% del efecto se origina en los nutrientes del suelo, entonces la intervención más eficiente sería mejorar la fertilidad del suelo, no simplemente suplementar el forraje de manera directa.

Esta diferencia no es solo una cuestión teórica. Un programa de emergencia climática que solo se enfoque en suplementar forraje durante El Niño (eslabón 5 de la cadena) solo aborda el 38% del problema de la reducción en la producción de leche. Por otro lado, un programa que también incluya fertilización nitrogenada de contingencia para devolver el N mineral al suelo (eslabón 4) y conserve la cobertura vegetal para regular la temperatura del suelo (eslabón 2) puede abordar hasta el 90% del problema, utilizando el mismo presupuesto, pero distribuido entre tres eslabones en lugar de concentrarse en uno solo.

9.7 Las Hipótesis del Proyecto: Verificación Final con el SEM

La verificación de las cinco hipótesis del proyecto se realiza a partir de los resultados obtenidos del SEM completo

H1 — La variabilidad climática interanual explica $> 40\%$ de la varianza del N del suelo, con efectos diferentes entre tipos: **VERIFICADA**. $R^2(N_mineral) = 0,74$ para el Tipo I ($> 40\%$). Prueba de invarianza: todos los coeficientes de la cadena clima–suelo difieren entre tipos ($p < 0,008$). La H1 es la más directamente verificada por el SEM.

H2 — Los factores climáticos y edáficos explican $> 60\%$ de la varianza de la PPNA y la calidad del forraje, con efectos diferentes entre tipos: **VERIFICADA**. $R^2(PPNA) = 0,79$ y $R^2(PC_forraje) = 0,78$ para el Tipo I (ambos $> 60\%$). Efectos diferentes entre tipos: β_{51} Tipo I=0,74 vs. Tipo IV=0,48 ($p=0,002$).

H3 — La producción de leche está determinada en $> 50\%$ por la disponibilidad y calidad del forraje, con diferencias entre tipos: **VERIFICADA**. El forraje explica el 68% de la varianza

de L_{leche} (R^2 total = 0,72; $\beta_{61} = +0,82$ explica la fracción dominante de la varianza explicada). β_{61} difiere entre tipos ($p = 0,014$).

H4 — Las pérdidas económicas por eventos extremos son estadísticamente significativas con diferencias entre tipos: **PARCIALMENTE VERIFICADA** (la cuantificación en USD se completa en el Cap. 10). $\beta_{\text{total}}(\text{ONI} \rightarrow \text{Ingreso}) = -0,58$ ($p < 0,001$). Los coeficientes difieren entre tipos (prueba de invarianza). Cuantificación económica pendiente.

H5 — Las estrategias de adaptación diferenciadas por tipo son más eficientes que las uniformes, con relación costo-beneficio positiva: **PARCIALMENTE VERIFICADA** (la evaluación costo-beneficio se completa en el Cap. 12). $\beta_{\text{Nutri} \rightarrow \text{Ingreso}} (+0,66) > \beta_{\text{Precio} \rightarrow \text{Ingreso}} (+0,61)$: mejorar la fertilidad del suelo tiene mayor retorno esperado que la política de precios, sustentando la eficiencia de estrategias diferenciadas por eslabón.

9.8 El SEM como Mapa de Intervención: Dónde Actuar para el Mayor Impacto

9.8.1 La Jerarquía de Eficiencia de Intervención por Eslabón

El resultado más práctico del SEM es la jerarquía de eficiencia de intervención por eslabón para el Tipo I durante un fuerte episodio de El Niño. Esta jerarquía se ha calculado utilizando coeficientes estandarizados.

- Entre la disponibilidad de nitrógeno (N) mineral del suelo y la producción de un determinado volumen de leche (L). En este sentido, el efecto total estandarizado señala que la senda de la relación entre N mineral y L es $\beta_{4 \rightarrow 7} = +0,66$. Esta evidencia pone de manifiesto la considerable importancia de la disponibilidad de N mineral dentro de la cadena de relaciones que se ha definido en este estudio.

- Estimación económica. Si se reproducen las condiciones empleadas para la modelización — 1,1 L/vaca/día de incremento potencial, 8,4 vacas por finca, 0,42 USD/L y un periodo de 30 días — la ganancia adicional estimada se estimaría en el entorno de los 116 USD por finca al mes. Considerando además un coste estimado de 28-36 USD/ha, la relación beneficio/costo bruto esperada quedaría entre 3,2 y 4,2, por lo que sería necesario tomar estos valores como una estimación económica bajo los supuestos del modelo y no como un resultado experimental.

-Implicación técnica. A partir de esta relación, se plantea como estrategia de manejo la aplicación de una fertilización nitrogenada de contingencia de 30 a 40 kg de N/ha durante episodios climáticos que comprometan la disponibilidad de nitrógeno. Esta medida constituye una propuesta de manejo derivada de los resultados del modelo y deberá ser evaluada mediante ensayos específicos antes de recomendarse como práctica generalizada.

- Eslabón 5 (suplementación forrajera): $\beta_{5 \rightarrow 7_total} = +0,68$. Con una suplementación de 3 a 4 kg de materia seca por vaca al día, ya sea en forma de silo o heno, se puede lograr un incremento de +1,8 L/vaca/día durante el episodio. El costo estimado de esta suplementación oscila entre USD 128 y 192 por finca al mes, resultando en un retorno bruto de 1,8 a 2,2 veces. Este retorno es menor en comparación con la fertilización nitrogenada, ya que el costo de la suplementación externa es más alto.

- Combinación de los eslabones 4 y 5 (estrategia dominante): se observa un efecto sinérgico que supera la suma de los dos efectos individuales. El mayor nivel de N mineral mejora la calidad del forraje disponible, mientras que la suplementación ayuda a cubrir el déficit en cantidad. Juntos, estos enfoques logran mitigar hasta el 90% del impacto negativo del episodio sobre la producción de leche.

El Capítulo 13 formaliza esta combinación como el protocolo de intervención, que se activa a través del sistema de alerta temprana cuando se cruza un índice SPI-3 de $-1,0$.

9.9 Limitaciones del SEM y Agenda de Investigación Futura

9.9.1 Las Tres Limitaciones Principales

Primera — Período de monitoreo: el SEM se calculó utilizando 24 meses de datos que abarcan el fenómeno de La Niña 2022–2023 y la transición hacia un El Niño moderado en 2024. Sin embargo, no se observó un evento de El Niño fuerte de manera directa. Los coeficientes relacionados con El Niño fuerte se derivan de reconstrucciones históricas. Ampliar el monitoreo a un periodo de 5 años, incorporando un evento ENSO fuerte, podría mejorar notablemente la precisión de los coeficientes, además de disminuir la incertidumbre en las proyecciones de los Capítulos 10 a 12.

Segunda — Endogeneidad del manejo: los ganaderos ajustan su forma de manejo (carga animal, fertilización, suplementación) en respuesta a las condiciones climáticas. Esto genera una correlación entre las variables de manejo y los residuos del modelo. Aunque el SEM aborda esta endogeneidad al incluir el manejo como covariable, no puede eliminarla por completo sin

contar con variables instrumentales exógenas. El ONI, utilizado como variable instrumental exógena para el clima (presentado en el Capítulo 10), ayuda a mitigar este problema de manera parcial.

Tercera — Mecanismos no capturados: el SEM no toma en cuenta el ciclo reproductivo del hato, que incluye el impacto del balance energético negativo sobre el IEP y el número de vacas en producción, ni la condición corporal de los bovinos o la mortalidad diferencial. Estos factores influyen en el costo económico total de los eventos extremos; su omisión lleva a una subestimación del impacto en el Tipo I. En el Capítulo 10 se incluye una corrección por efecto reproductivo, basada en los datos del IEP que aparecen en la Tabla 8.1.

9.10 síntesis del capítulo

- El SEM (Tabla 41) se realizó en siete eslabones e incluye cinco variables latentes endógenas y cuatro variables exógenas observadas (ONI, SPI-3, FDD e IAP) y doce variables observadas endógenas, que se utilizan como indicadores. El estimador MLR con corrección de Satorra-Bentler fue la elección utilizada y se fijaron rezagos, incluido uno de dos meses para el ONI. Todas las variables fueron estandarizadas. Las cargas factoriales y los valores de R^2 presentados son de la estimación del SEM completo respecto a los cuatro tipos de sistemas ganaderos. Las cargas factoriales fueron de tres veces más las de ureasa de $\lambda_2=0,84$, N_mineral $\lambda_4=0,88$ y PC_forraje $\lambda_8=0,82$. Los valores de R^2 fueron de 0,76 para T_suelo, 0,74 para N_mineral, 0,79 para PPNA, 0,78 para PC, 0,72 para L_leche y 0,86 para Ingreso.
- Los índices de ajuste se encuentran en la Tabla 42. En el modelo global, los resultados son: CFI=0,94; RMSEA=0,048; SRMR=0,042; $\chi^2/gl=2,28$. Para el Tipo I, los índices son: CFI=0,96; RMSEA=0,038; SRMR=0,034; $\chi^2/gl=1,84$. Los datos no rechazan la cadena causal que se propone en el Capítulo 2, destacando que el ajuste es más favorable en el Tipo I, que presenta menor heterogeneidad de manejo y una señal climática predominante.
- Respecto a los efectos directos, indirectos y totales (Tabla 43), se observan las siguientes relaciones: ONI $\rightarrow$ N_mineral, con un β_{total} de -0,56 (68% mediado a través del suelo); ONI $\rightarrow$ PC_forraje, β_{total} de -0,52, indicando mediación completa; ONI $\rightarrow$ L_leche, β_{total} de -0,58 (79% mediado). Por otro lado, $\eta_{Nutri} \rightarrow$ L_leche muestra un β_{total} de +0,66, y SPI-3 $\rightarrow$ L_leche presenta un β_{total} de +0,52 (73% mediado por el suelo). Un hallazgo clave es que $\beta_{Nutri} \rightarrow$ Ingreso (+0,66) supera a $\beta_{Precio} \rightarrow$ Ingreso (+0,61), lo

que sugiere que invertir en la fertilidad del suelo es la mejor estrategia para los ganaderos del páramo en el corredor del Carchi.

- En la prueba de invarianza (Tabla 44), se observa que los coeficientes biofísicos muestran diferencias significativas entre los tipos ($p < 0,38$): β_{71} (leche $\rightarrow$ ingreso: 0,80–0,84) y β_{72} (precio $\rightarrow$ ingreso: 0,58–0,64). La invarianza económica permite implementar un modelo de ingreso unificado para todos los tipos, que se discutirá en el Capítulo 10.
- En la comparación con modelos alternativos (Tabla 45), el SEM completo supera a los 5 modelos alternativos en términos de AIC, con ΔAIC que varía de +82 a +284. El modelo de panel con efectos fijos ($\Delta AIC = +82$) es el mejor para hacer predicciones, aunque no permite descomponer los efectos directos e indirectos. Por otro lado, el SEM que no incluye la interacción tipo $\times$ ENSO ($\Delta AIC = +168$) podría subestimar el impacto en el Tipo I entre un 40% y un 60%. Asimismo, el SEM sin variables latentes ($\Delta AIC = +86$) genera coeficientes sesgados hacia cero debido a errores de medición.
- En cuanto a la verificación de hipótesis, se confirma la H1 ($R^2(N_mineral) = 0,74 > 40\%$; todos los coeficientes clima-suelo son diferentes entre tipos). La H2 también se verifica ($R^2(PPNA) = 0,79$ y $R^2(PC) = 0,78$, ambos $> 60\%$). La H3 se cumple, ya que el forraje explica el 68% de la varianza de la leche, y β_{61} varía entre tipos. La H4 se verifica parcialmente con un β_{total} de -0,58, y no se puede confirmar la mediación de $\beta_{Precio} \rightarrow$ Ingreso. Finalmente, se abordará una evaluación costo-beneficio en el Capítulo 12.

CAPÍTULO 10

Costos de Producción, Márgenes Económicos e Impacto Financiero de la Variabilidad Climática

Estructura detallada de costos por tipo de sistema, márgenes económicos y puntos de equilibrio en fase ENSO neutra, cuantificación de las pérdidas por eventos extremos por finca y a escala provincial, pérdida anualizada esperada de USD 6,4 M/año para el sector ganadero del Carchi, y modelo econométrico de panel con el ONI como variable instrumental



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** la estructura detallada de costos de producción por tipo de sistema ganadero del corredor del Carchi —incluyendo los componentes variables, los costos fijos y el costo por litro producido— e identificar las diferencias estructurales que explican la menor rentabilidad de los sistemas del páramo alto.
- **Calcular** los márgenes económicos (margen bruto, margen neto, punto de equilibrio y retorno sobre el activo) para cada tipo de sistema en un año de fase ENSO neutra, y comprender por qué el 28% de las fincas del Tipo I opera por debajo del punto de equilibrio incluso en los años de mejor clima.

- **Cuantificar** las pérdidas económicas por finca durante los eventos El Niño fuerte, El Niño moderado y La Niña fuerte, desagregadas en sus cuatro componentes: reducción de producción de leche, costo adicional de suplementación, pérdida por descarte forzoso de vacas y pérdida por aumento del intervalo entre partos.
- **Calcular** la pérdida total del sector ganadero del Carchi durante los eventos climáticos extremos a escala provincial, la distribución de esa pérdida entre los cuatro tipos de sistemas, y la Pérdida Anualizada Esperada (EAL) de USD 6,4 M/año, que establece el referente financiero para el dimensionamiento del seguro climático del Capítulo 13.
- **Interpretar** los resultados del modelo econométrico de panel con efectos fijos que usa el ONI como variable instrumental para el clima, incluyendo los coeficientes de producción de leche, precio, ONI, SPI-3 y la interacción suplementación $\times$ ONI que cuantifica el retorno económico de la suplementación como instrumento de adaptación.
- **Aplicar** el resultado central del capítulo —la relación costo de adaptación / costo de inacción de 1:9,1 para El Niño fuerte— como argumento económico de la urgencia de la implementación del paquete de adaptación que los Capítulos 12 y 13 desarrollan.

10.1 Introducción: La Traducción del Impacto Biofísico al Lenguaje Económico

Los Capítulos 4 a 9 han desarrollado y consolidado de manera completa la cadena de causalidad que va desde la variabilidad climática hasta la producción de leche. Ahora, el Capítulo 10 representa el paso final de la Parte IV: convierte las reducciones en la producción en disminuciones de ingresos, las relaciona con los costos de producción y calcula las pérdidas netas, sumando dichas pérdidas a la escala del corredor y la provincia. Esto nos permite vislumbrar el impacto económico que el riesgo climático implica para el sector ganadero del Carchi.

Este capítulo ofrece dos contribuciones originales a la literatura económica del sector ganadero de la región. Primero, presenta una estructura de costos de producción desglosada por tipo de sistema, utilizando datos de encuestas recolectados de las 80 Unidades de Producción Agropecuaria (UPAs) del proyecto. Estos son los primeros datos con tal nivel de detalle para el corredor del Carchi. En segundo lugar, se cuantifican las pérdidas económicas derivadas de eventos climáticos, teniendo en cuenta no solo la disminución en la producción de leche, sino también los costos adicionales de suplementación, las pérdidas por descarte forzoso y los costos

diferidos asociados al aumento del intervalo entre partos. Estos son aspectos que frecuentemente se pasan por alto en la literatura económica relacionada con el impacto climático.

La cuantificación de estas pérdidas, expresadas en dólares y en relación con el margen neto de cada tipo de sistema, se convierte en un insumo esencial para los Capítulos 11, 12 y 13. Sin conocer cuánto pierde un ganadero del Tipo I durante un evento fuerte de El Niño (que asciende a USD 5.840, equivalente al 150% de su margen neto anual), resulta imposible dimensionar el costo de las estrategias de adaptación o calcular su retorno esperado. Este análisis es el núcleo del Capítulo 12. Pero el dato de USD 5.840 no es solo una cifra de impacto; se convierte en el estándar para evaluar la eficiencia de cualquier instrumento de política que se proponga en el Capítulo 13.

10.2 Estructura de Costos de Producción por Tipo de Sistema

10.2.1 Metodología de la Encuesta de Costos

Los datos relacionados con los costos provienen de una encuesta económica realizada a 80 UPAs del proyecto durante el primer semestre de 2024. Esta encuesta de costos utilizó el método de costos completos, también conocido como full cost accounting. Este enfoque abarca no solo los costos explícitos, que son los desembolsos de efectivo, sino también los costos implícitos. Estos últimos incluyen la mano de obra familiar, valorada según el salario del mercado, y el costo de oportunidad de la tierra que pertenece al ganadero.

Utilizar esta metodología resulta en un costo de producción más elevado que el que el ganadero considera en su flujo de caja, el cual solo refleja los desembolsos en efectivo. Sin embargo, proporciona una imagen más precisa del costo económico real de la actividad. Por ejemplo, el costo por litro calculado con costos completos (ver Tabla 46) representa la métrica más fiel de la rentabilidad en la ganadería lechera, clasificada por tipo de sistema.

El margen de USD 0,072 por litro en el Tipo I, que se calcula restando el costo completo de USD 0,348 del precio de USD 0,42, es tan ajustado que una reducción en la producción del 17% o más—el umbral de un El Niño moderado en este tipo—podría convertirlo en una pérdida neta durante ese periodo. Este margen tan estrecho explica por qué el impacto climático puede

tener consecuencias financieras desproporcionadas para los ganaderos que operan en el páramo.

Tabla 46.

Estructura Detallada de Costos de Producción por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (USD/finca/año; precios constantes 2024; n = 80 UPAs del proyecto)

Componente del Costo (USD/finca/año; precios constantes 2024)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Notas metodológicas
COSTOS VARIABLES TOTALES (USD/finca/año)	USD 4.280 ± 820	USD 8.640 ± 1.240	USD 18.460 ± 2.680	USD 46.820 ± 5.840 Fuente: encuesta de costos a las 80 UPAs del proyecto (UPEC, 2024); precios de insumos del mercado del Carchi (primer semestre 2024). Los costos variables son los que cambian con el nivel de producción y con los eventos climáticos.
— Alimentación y pastoreo (insumos para el pastizal: semilla, fertilizantes, herbicidas; estimado del costo del forraje del pastizal propio)	USD 820 ± 180 (19% del total de costos variables; mayoritariamente costo del pastizal sin fertilización ni renovación)	USD 1.840 ± 320 (21%)	USD 4.280 ± 640 (23%)	USD 9.640 ± 1.280 (21%) El porcentaje del costo de alimentación sobre la total variable es relativamente estable entre tipos (~20%), pero en el Tipo I la mayor parte es el costo implícito del pastizal (costo de oportunidad de la tierra), mientras que en el Tipo IV incluye suplementos y fertilizantes explícitamente adquiridos.
— Suplementación forrajera (silo, heno, concentrado, balanceado; compra externa)	USD 280 ± 120 (6,5% del total; solo el 12% de las fincas del Tipo I suplementa sistemáticamente; el monto promedio se	USD 680 ± 180 (7,9%)	USD 3.240 ± 480 (17,6%)	USD 10.840 ± 1.640 (23,2%) El porcentaje de suplementación sobre la total variable es el indicador de desacoplamiento de

Componente del Costo (USD/finca/año; precios constantes 2024)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Notas metodológicas
	diluye por las fincas que no suplementan)			la producción respecto a la variabilidad del pastizal: 6,5% en Tipo I (alta exposición) vs. 23,2% en Tipo IV (alta capacidad de amortiguamiento).
— Mano de obra (ordeño, manejo del hato, pastoreo, mantenimiento)	USD 1.680 ± 280 (39% del total; mayoritariamente mano de obra familiar valorada al jornal de mercado de USD 18/día)	USD 3.120 ± 420 (36%)	USD 5.840 ± 820 (32%)	USD 14.280 ± 1.820 (30,5%) El porcentaje de mano de obra sobre la total variable decrece con la tecnificación porque los sistemas más intensivos tienen mayor productividad de la mano de obra (más litros por jornal). El Tipo I tiene la mayor proporción de mano de obra familiar, cuyo costo de oportunidad es bajo en la economía del páramo.
— Sanidad animal (vacunas, antiparasitarios, medicamentos, asistencia veterinaria)	USD 480 ± 120 (11%)	USD 840 ± 180 (9,7%)	USD 1.480 ± 280 (8%)	USD 3.280 ± 520 (7%) El porcentaje de sanidad decrece con la tecnificación principalmente porque el costo total crece más rápido que el costo de sanidad (efecto de escala), no porque el Tipo IV aplique menos sanidad (que en realidad aplica más).
— Otros variables (energía, transporte de leche, análisis de laboratorio, insumos menores)	USD 1.020 ± 180 (24%)	USD 2.160 ± 320 (25%)	USD 3.620 ± 480 (19,6%)	USD 8.780 ± 1.120 (18,8%)

Componente del Costo (USD/finca/año; precios constantes 2024)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Notas metodológicas
COSTOS FIJOS TOTALES (USD/finca/año)	USD 2.840 ± 480	USD 4.680 ± 720	USD 8.420 ± 1.240	USD 18.640 ± 2.480
— Depreciación de infraestructura y equipos (establo, sala de ordeño, tanque de frío, cerca eléctrica)	USD 1.240 ± 240 (44% de los costos fijos; el costo de la infraestructura del Tipo I es más bajo en valor absoluto pero más alto como porcentaje del ingreso)	USD 2.080 ± 360 (44%)	USD 3.640 ± 580 (43%)	USD 8.240 ± 1.120 (44%) El porcentaje de depreciación sobre los costos fijos es estable (~44% en todos los tipos), reflejando que la estructura de capital de la ganadería lechera tiene una composición similar independientemente del tipo de sistema.
— Intereses financieros (costo del crédito; incluye crédito formal e informal)	USD 480 ± 120 (17%)	USD 840 ± 180 (18%)	USD 1.840 ± 320 (22%)	USD 4.480 ± 680 (24%) El porcentaje de intereses crece con la tecnificación porque los sistemas más intensivos tienen mayor endeudamiento relativo, lo que los hace más vulnerables a los impactos de flujo de caja de los eventos El Niño.
— Impuestos, seguros y costos de formalización	USD 240 ± 60 (8,5%)	USD 480 ± 80 (10,3%)	USD 840 ± 120 (10%)	USD 1.840 ± 280 (9,9%) Solo el 18% de las fincas del Tipo I tiene algún seguro agropecuario (principalmente seguro de ganado contra muerte accidental); ninguna tiene seguro climático indexado.
— Renta de la tierra (costo de oportunidad;	USD 880 ± 180 (31%)	USD 1.280 ± 240 (27%)	USD 2.100 ± 360 (25%)	USD 4.080 ± 520 (22%) La renta de la tierra decrece como porcentaje del costo

Componente del Costo (USD/finca/año; precios constantes 2024)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial — Notas metodológicas
propietarios o arrendatarios)				fijo con la tecnificación porque el valor productivo de la tierra (por hectárea) crece menos que los demás costos fijos en los sistemas intensivos.
COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN (USD/finca/año)	USD 7.120 ± 1.040	USD 13.320 ± 1.680	USD 26.880 ± 3.280	USD 65.460 ± 7.280
COSTO POR LITRO DE LECHE PRODUCIDA (USD/L; incluye todos los costos)	USD 0,348 ± 0,048/L (cercano al margen de viabilidad; el precio al productor de USD 0,42/L deja un margen neto de solo USD 0,072/L en años normales)	USD 0,286 ± 0,038/L	USD 0,238 ± 0,028/L	USD 0,198 ± 0,022/L El gradiente de costo por litro (0,348 → 0,198 entre Tipo I y IV) refleja las economías de escala y de productividad: el Tipo IV produce más litros con menor costo unitario. Esta diferencia de 1,76× en el costo por litro, combinada con la diferencia de 3,5× en producción, explica la diferencia de rentabilidad entre los sistemas del páramo y el valle.

Nota. Elaboración propia con base en datos primarios del proyecto (UPEC, 2024).

10.2.2 El Costo por Litro como Indicador de Vulnerabilidad Estructural

La diferencia en el costo por litro entre los tipos —USD 0,348 para el Tipo I y USD 0,198 para el Tipo IV— pone de manifiesto la trampa de la productividad en el páramo. Los sistemas que están a menor altitud generan más litros por vaca, por hectárea y por cada dólar invertido, lo que les permite reducir el costo unitario a través de economías de escala y mayor productividad.

Sin embargo, el ganadero del Tipo I se enfrenta a un gran desafío: no puede alcanzar el costo por litro del Tipo IV sin realizar cambios drásticos en su sistema. Esto implicaría la remoción

del páramo, la mejora de pasturas y la adopción de razas de alta producción. Pero llevar a cabo esa transformación conlleva costos de capital, ambientales y sociales que están más allá del alcance de la mayoría de los ganaderos en el páramo.

Como resultado, se mantiene una asimetría estructural en los márgenes, que persiste incluso sin perturbaciones climáticas. El Tipo I opera con un margen de USD 0,072 por litro sobre el costo total, mientras que el Tipo IV cuenta con un margen de USD 0,222 por litro. Esta notable diferencia de 3,1 veces en el margen por litro, sumada a la disparidad de 3,5 veces en el volumen producido, da lugar a una diferencia de 10,8 veces en el margen neto anual entre el Tipo I (USD 3.870) y el Tipo IV (USD 98.530).

10.3 Márgenes Económicos y Rentabilidad en Año de Fase ENSO Neutra

Tabla 47.

Márgenes Económicos, Punto de Equilibrio y Retorno sobre el Activo por Tipo de Sistema Ganadero del Corredor del Carchi (USD/finca/año; fase ENSO neutra 2023–2024)

Indicador de Rentabilidad (USD/finca/año; fase ENSO neutra 2023–2024)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial Interpretación económica
Ingreso bruto por venta de leche (USD/finca/año; precio promedio USD 0,42/L)	USD 9.510 ± 2.860 (62 L/día × 365 días × USD 0,42/L; alta variabilidad por estacionalidad del 38,4% CV)	USD 27.924 ± 6.580	USD 63.756 ± 12.280	USD 154.350 ± 24.840 El ingreso bruto anual del Tipo IV es 16,2× mayor que el del Tipo I, reflejando la diferencia de 16,2× en producción total/finca (Tabla 8.1). El precio al productor (USD 0,42/L) no difiere entre tipos porque todos venden a los mismos centros de acopio provinciales.
Ingreso por otros productos (venta de animales de descarte, becerros, estiércol)	USD 1.480 ± 420 (16% del ingreso bruto total)	USD 2.840 ± 620 (10%)	USD 4.820 ± 840 (7,6%)	USD 9.640 ± 1.480 (6,2%) El porcentaje de ingreso por productos distintos a la leche es mayor en el Tipo I (16%) que en el Tipo IV (6,2%), reflejando

Indicador de Rentabilidad (USD/finca/año; fase ENSO neutra 2023–2024)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial Interpretación económica
				la mayor importancia de la actividad ganadera de ciclo completo (cría + leche) en el páramo frente a la especialización lechera del valle.
INGRESO BRUTO TOTAL (USD/finca/año)	USD 10.990 ± 3.040	USD 30.764 ± 6.940	USD 68.576 ± 13.240	USD 163.990 ± 24.960
MARGEN BRUTO (Ingreso bruto – Costos variables; USD/finca/año)	USD 6.710 ± 2.480 (61% del ingreso bruto; margen bruto positivo pero ajustado)	USD 22.124 ± 5.840 (72%)	USD 50.116 ± 10.280 (73%)	USD 117.170 ± 19.540 (71%)
MARGEN NETO (Ingreso bruto – Costo total incluyendo costos fijos; USD/finca/año)	USD 3.870 ± 1.840 (35% del ingreso bruto; es el 'sueldo' anual del ganadero del Tipo I por su actividad ganadera, equivalente a USD 322/mes)	USD 17.444 ± 5.260 (57%)	USD 41.696 ± 9.960 (61%)	USD 98.530 ± 17.680 (60%) El margen neto del Tipo I (USD 3.870/año = USD 322/mes) está por debajo de la línea de pobreza urbana del Ecuador (USD 470/mes) y apenas supera la línea de pobreza rural (USD 280/mes). La ganadería del páramo no proporciona por sí sola un ingreso suficiente para el estándar de vida mínimo de la familia rural ecuatoriana.
PUNTO DE EQUILIBRIO (producción mínima de litros/finca/año para cubrir todos los costos a precio de USD 0,42/L)	16.952 L/año (46,4 L/finca/día); la producción media del Tipo I es 22.630 L/año (62 L/día) → margen sobre	31.714 L/año (86,9 L/día); el 12% de las fincas del Tipo II está por debajo del punto de equilibrio en años normales	63.952 L/año (175,2 L/día); el 6% de las fincas del Tipo III está por debajo del punto de equilibrio en años normales	155.857 L/año (427,0 L/día); el 3% de las fincas del Tipo IV está por debajo del punto de equilibrio en años normales El porcentaje de fincas por debajo del punto de equilibrio en años

Indicador de Rentabilidad (USD/finca/año; fase ENSO neutra 2023–2024)	Tipo I Páramo extensivo	Tipo II Semi-tecnificado	Tipo III Tecnificado	Tipo IV Empresarial Interpretación económica
	el punto de equilibrio: 33,5% — el 28% de las fincas del Tipo I produce por debajo del punto de equilibrio en años de fase ENSO neutra			normales (28% del Tipo I; 3% del Tipo IV) es el indicador de vulnerabilidad estructural más directo: estas fincas no son viables económicamente ni en los años de mejor clima.
RETORNO SOBRE EL ACTIVO (ROA; margen neto / valor de los activos de la finca × 100)	ROA = 3,2% ± 1,4% (el rendimiento del capital invertido en la ganadería del Tipo I es inferior a la tasa de depósito bancario del 4,5% en Ecuador en 2024: el ganadero del páramo 'pierde' frente al costo de oportunidad financiero del capital)	ROA = 5,8% ± 1,8%	ROA = 7,4% ± 2,2%	ROA = 9,6% ± 2,4% El ROA del Tipo I (3,2%) inferior a la tasa bancaria (4,5%) es el indicador que más claramente muestra la trampa de viabilidad del sistema del páramo: la ganadería no es el uso más rentable del capital disponible para el ganadero del Tipo I, pero factores no económicos (identidad, tradición familiar, costo de la reconversión) explican la persistencia del sistema.

Nota. Elaboración propia.

10.3.1 El 28% del Tipo I: Inviabilidad Estructural, No Climática

Uno de los hallazgos más inquietantes de la Tabla 47 es que el 28% de las fincas del Tipo I opera por debajo de su punto de equilibrio durante un año con fase ENSO neutra, es decir, sin ninguna alteración climática significativa. Estas fincas no son simplemente vulnerables al cambio climático; son, de hecho, estructuralmente inviables bajo los costos y precios actuales, sin importar las condiciones climáticas.

La razón por la que siguen existiendo se debe a factores que no son económicos: la tierra es de propiedad familiar y no se puede vender fácilmente, la actividad proporciona seguridad

alimentaria inmediata para la familia, y la identidad ganadera tiene un valor cultural que no se refleja en un análisis económico convencional. No obstante, su permanencia conlleva una progresiva descapitalización de las familias implicadas.

Es crucial distinguir entre la vulnerabilidad estructural (inviabilidad en años comunes) y la vulnerabilidad climática (viabilidad en años normales, pero inviabilidad durante eventos extremos) para el diseño de políticas. Los instrumentos de adaptación climática, como el seguro, la fertilización de contingencia y los sistemas de alerta temprana, solo son eficaces para el 72% del Tipo I que es viable en años normales. Por otro lado, el 28% que es estructuralmente inviable requiere un enfoque diferente: una reconversión productiva, diversificación de ingresos o apoyo para un retiro ordenado de la actividad.

"Yo sé que las cuentas no dan. Pero esta tierra es de mis abuelos. No la voy a dejar porque un año salga malo. Lo que necesito es que alguien me ayude a que salga menos malo." (Testimonio de ganadero del Tipo I, cantón Bolívar, diagnóstico participativo UPEC 2023).

10.4 Cuantificación de las Pérdidas Económicas por Evento Climático Extremo

Tabla 48.
Pérdidas Económicas por Finca durante los Principales Eventos Climáticos Extremos del Corredor del Carchi, Desagregadas por Componente y Tipo de Sistema (USD/finca/episodio; precios constantes 2024)

Evento Climático y Componente de la Pérdida	Pérdida del Tipo I (USD/finca/episodio)	Pérdida del Tipo II	Pérdida del Tipo III	Pérdida del Tipo IV — Metodología de cálculo y fuentes
EL NIÑO FUERTE (8 meses; ref. 2015–2016): PÉRDIDA TOTAL POR FINCA	USD 5.840 ± 1.480 (equivale al 150% del margen neto anual del Tipo I en año normal: el episodio elimina el ingreso neto de más de un año y medio)	USD 7.240 ± 1.820	USD 8.480 ± 2.120	USD 9.640 ± 2.480 Metodología: pérdida total = pérdida por reducción de producción de leche + costo adicional de suplementación de emergencia + pérdida por descarte forzoso de vacas + pérdida por aumento del IEP

Evento Climático y Componente de la Pérdida	Pérdida del Tipo I (USD/finca/episodio)	Pérdida del Tipo II	Pérdida del Tipo III	Pérdida del Tipo IV — Metodología de cálculo y fuentes
				(reducción de vacas en producción en el año siguiente). Todos los componentes se detallan en las filas siguientes.
— Pérdida por reducción de producción de leche durante el episodio (8 meses × reducción de L/finca/día × USD 0,42/L)	USD 3.820 ± 880 (–51% producción × 62 L/día × 243 días × USD 0,42/L = USD 3.820; el componente más cuantioso de la pérdida)	USD 4.960 ± 1.120 (–34% × 182 L/día × 243 días × USD 0,42/L)	USD 5.280 ± 1.280 (–23% × 416 L/día × 243 días × USD 0,42/L)	USD 5.380 ± 1.380 (–15% × 1.006 L/día × 243 días × USD 0,42/L) La pérdida absoluta en USD por reducción de leche es mayor en el Tipo IV (USD 5.380) que en el Tipo I (USD 3.820) porque la producción base del Tipo IV es mucho mayor; pero la pérdida relativa al margen neto anual es mayor en el Tipo I (99% del margen neto vs. 5,5% del margen neto del Tipo IV).
— Costo adicional de suplementación de emergencia durante el episodio	USD 480 ± 120 (el 12% de las fincas del Tipo I suplementa; costo medio del segmento que suplementa: USD 4.000/episodio; ponderado por 12%: USD 480)	USD 640 ± 160 (34% de fincas suplementan durante El Niño)	USD 1.280 ± 280 (68% de fincas)	USD 2.040 ± 420 (92% de fincas; costo alto pero parcialmente cubre la pérdida de producción) La diferencia de costo de suplementación entre tipos refleja tanto la mayor prevalencia de suplementación en los tipos tecnificados como la mayor cantidad

Evento Climático y Componente de la Pérdida	Pérdida del Tipo I (USD/finca/episodio)	Pérdida del Tipo II	Pérdida del Tipo III	Pérdida del Tipo IV — Metodología de cálculo y fuentes
				de animales suplementados. El bajo costo de suplementación del Tipo I no es una ventaja: refleja que la mayoría de las fincas no tiene acceso al capital para suplementar durante el episodio.
— Pérdida por descarte forzoso de vacas (venta involuntaria de vacas en ordeño que no quedan preñadas o caen en CC $\leq$ 2,0 durante el episodio)	USD 1.120 $\pm$ 480 (+28% de descarte adicional $\times$ 8,4 vacas $\times$ USD 480 valor promedio de descarte, vs. USD 1.200 valor de reposición = pérdida de USD 720/vaca adicional descartada)	USD 1.180 $\pm$ 520	USD 1.280 $\pm$ 560	USD 1.480 $\pm$ 640 La pérdida por descarte forzoso es la más duradera e irreversible de las pérdidas durante El Niño fuerte: la vaca descartada por USD 480 debe reponerse después del episodio por USD 1.200–1.400, y además la nueva vaca tarda 12–18 meses en alcanzar su pico de producción. El impacto sobre el capital de la finca persiste 2–3 años después del episodio.
— Pérdida por aumento del IEP (reducción de vacas en producción en los 12 meses siguientes al episodio)	USD 420 $\pm$ 140 (28% de vacas con IEP > 60 días adicionales $\times$ 8,4 vacas $\times$ 60 días $\times$ 7,4 L/día $\times$ USD 0,42/L = USD 420; pérdida diferida del episodio)	USD 460 $\pm$ 160	USD 640 $\pm$ 200	USD 740 $\pm$ 240 La pérdida por aumento del IEP es la menos visible de todas: no aparece como una reducción de producción durante el episodio sino como una

Evento Climático y Componente de la Pérdida	Pérdida del Tipo I (USD/finca/episodio)	Pérdida del Tipo II	Pérdida del Tipo III	Pérdida del Tipo IV — Metodología de cálculo y fuentes
				reducción de la producción en el año siguiente, cuando el clima ya ha mejorado. Los análisis de impacto de El Niño que no incluyen el efecto reproductivo subestiman el costo total del evento.
LA NIÑA FUERTE (10 meses; ref. 2010–2012): PÉRDIDA TOTAL POR FINCA	USD 2.840 ± 820 (equivale al 73% del margen neto anual del Tipo I; menor que El Niño fuerte pero significativo; incluye el efecto de arrastre del año siguiente)	USD 2.480 ± 720	USD 2.120 ± 640	USD 1.480 ± 480 La pérdida total por La Niña fuerte es mayor en el Tipo I que en el Tipo IV (en valor absoluto), a diferencia de lo que ocurre con El Niño fuerte (donde la pérdida absoluta es mayor en el Tipo IV por mayor producción base). Esta inversión refleja el mayor impacto relativo de La Niña sobre los sistemas del páramo.
— Pérdida por reducción de calidad del forraje (mecanismo dominante de La Niña en el Tipo I)	USD 1.840 ± 480 (–19% producción de leche en 10 meses; el 74% del impacto de La Niña pasa por la reducción de la calidad del forraje, no de la cantidad)	USD 1.280 ± 360	USD 980 ± 280	USD 620 ± 180 La metodología para calcular esta pérdida combina el modelo de producción de leche del Cap. 8 (corrección por PC) con el precio al productor. La reducción de calidad del forraje no es directamente

Evento Climático y Componente de la Pérdida	Pérdida del Tipo I (USD/finca/episodio)	Pérdida del Tipo II	Pérdida del Tipo III	Pérdida del Tipo IV — Metodología de cálculo y fuentes
				visible en los registros de producción, lo que explica por qué La Niña es el evento 'silencioso' del corredor del Carchi.
— Pérdida por daño estructural al suelo y efecto de arrastre en el año siguiente al episodio	USD 840 ± 280 (–8–12% reducción adicional de PPNA en el año post-La Niña fuerte por compactación y daño al pastizal × ingreso potencial del año siguiente)	USD 840 ± 280	USD 680 ± 220	USD 480 ± 160 Este componente de la pérdida es el más subestimado en la literatura de impacto climático del sector ganadero andino: los análisis que evalúan el impacto solo durante el episodio pierden el 30–40% del costo de La Niña fuerte en el Tipo I.

Nota. Elaboración propia.

10.4.1 La Pérdida Invisible del Descarte Forzoso

Entre los cuatro factores que contribuyen a las pérdidas durante un fuerte episodio de El Niño, el descarte forzado de vacas es el menos evidente en las estadísticas de producción, pero sus consecuencias económicas son las más duraderas. Si una vaca es descartada durante este fenómeno por un valor de USD 480 (su precio en el mercado como animal de carne), para reponerla después se necesitará una inversión de entre USD 1.200 y USD 1.400 (costo de una vaca lechera de reemplazo). La diferencia neta de USD 720 a USD 920 representa la pérdida directa.

Sin embargo, la situación es aún más complicada. La nueva vaca requiere de un tiempo de 12 a 18 meses para alcanzar su máximo potencial de producción, y durante ese tiempo solo produce entre el 60% y el 70% de lo que podría lograr en condiciones normales. Al sumar el costo del descarte forzado y las pérdidas durante el período de adaptación de la vaca de

reemplazo, el costo total se eleva entre USD 1.800 y USD 2.400 por vaca. Esto es significativamente más alto que los USD 1.120 que se estimaron en la Tabla 48, que solo toma en cuenta la diferencia de precio entre el descarte y el reemplazo.

Esta revisión al alza en los costos del descarte sugiere que las pérdidas de El Niño fuerte que se indican en la Tabla 48 son realmente subestimaciones. En realidad, el costo total de este evento para las fincas del Tipo I puede acercarse a un rango de USD 7.500 a USD 9.200 por finca cuando se considera el período de adaptación de las vacas de reposición. Esta cifra, que equivale a aproximadamente el doble del margen neto anual del Tipo I, pone de manifiesto el impacto devastador que los episodios fuertes de El Niño pueden tener, ya que generan ciclos de endeudamiento en los ganaderos de los páramos que pueden persistir de 3 a 5 años después de que el fenómeno climático haya concluido.

10.5 Pérdidas Económicas Agregadas a Escala Provincial: El Riesgo Climático como Pasivo Público

Tabla 49.

Pérdidas Económicas del Sector Ganadero Lechero del Carchi a Escala Provincial: Pérdida por Episodio, Distribución entre Tipos de Sistema y Pérdida Anualizada Esperada (EAL)

Evento / Escala de Análisis	Pérdida Total Estimada para el Sector Ganadero del Carchi (USD/episodio)	Distribución de la Pérdida entre Tipos de Sistema (% del total provincial)	Costo de Inacción vs. Costo de Adaptación: Marco para el Cap. 12
El Niño fuerte (ref. 2015–2016): pérdida total del sector ganadero lechero del Carchi	USD 38,4 M $\pm$ 8,6 M (rango de confianza 95%: USD 29,8–47,0 M). Base de cálculo: pérdida media por finca $\times$ número de fincas por tipo (Tipo I: USD 5.840 $\times$ 620 fincas = USD 3,6 M; Tipo II: USD 7.240 $\times$ 480 fincas = USD 3,5 M; Tipo III: USD 8.480 $\times$ 540 fincas = USD 4,6 M; Tipo IV: USD 9.640 $\times$ 280 fincas = USD 2,7 M; total: USD 14,4 M de pérdidas directas de	Tipo I: 9% de la pérdida total provincial (a pesar de representar el 8,4% de la producción); Tipo II: 23%; Tipo III: 36%; Tipo IV: 32%. La pérdida absoluta más grande es la del Tipo III y IV (por su mayor producción base), pero la pérdida relativa al margen neto es la mayor en el Tipo I (150% del margen neto anual).	Costo de inacción durante El Niño fuerte: USD 38,4 M/episodio. Costo estimado del paquete de adaptación (fertilización de contingencia + suplementación proteica + reservas de forraje) si estuviera pre-establecido para todas las fincas del corredor: USD 4,2 M/episodio. Relación costo de adaptación / costo de inacción: 1:9,1. Cada peso invertido en adaptación evita USD 9,1 de pérdidas. Este es el argumento económico central para el Cap. 12.

Evento / Escala de Análisis	Pérdida Total Estimada para el Sector Ganadero del Carchi (USD/episodio)	Distribución de la Pérdida entre Tipos de Sistema (% del total provincial)	Costo de Inacción vs. Costo de Adaptación: Marco para el Cap. 12
	producción + USD 14,8 M de costos adicionales de suplementación y reposición de ganado a escala provincial + USD 9,2 M de pérdidas indirectas por efecto reproductivo y daños a la cadena de proveedores).		
El Niño moderado (duración media 5 meses; frecuencia histórica: cada 4–6 años)	USD 14,8 M $\pm$ 3,2 M. Base de cálculo: pérdida media por finca (El Niño moderado, Tabla 10.3) $\times$ número de fincas por tipo. El Niño moderado ocurre con el doble de frecuencia que el fuerte, por lo que su impacto anualizado (USD 14,8 M / 5 años promedio = USD 2,96 M/año) es comparable al del fuerte (USD 38,4 M / 12 años promedio = USD 3,2 M/año).	Tipo I: 11% (proporción levemente mayor que en El Niño fuerte porque el impacto relativo del Niño moderado es proporcionalmente mayor en el Tipo I, donde incluso el episodio moderado supera el umbral de rentabilidad de muchas fincas)	El Niño moderado es el tipo de evento que más justifica los sistemas de alerta temprana: es suficientemente frecuente para que el retorno de la inversión en el sistema de alerta sea positivo en menos de 3 años, y suficientemente dañino para que la no intervención produzca pérdidas sistemáticas.
La Niña fuerte (duración media 10 meses; ref. 2010–2012)	USD 18,6 M $\pm$ 4,8 M. El impacto de La Niña fuerte es 48% del impacto de El Niño fuerte en valor absoluto, pero tiene una distribución diferente: se concentra más en los Tipos I y II (que son más sensibles a la caída de la calidad del forraje	Tipo I: 14% de la pérdida total provincial (mayor proporción que en El Niño fuerte, reflejando que La Niña afecta más a los sistemas del páramo en términos relativos); Tipo II: 26%; Tipo III: 34%; Tipo IV: 26%.	La Niña fuerte tiene el peor perfil de 'costo oculto': el daño estructural al suelo (estimado en USD 4,2 M de pérdidas en el año siguiente al episodio, no incluido en los USD 18,6 M del episodio) produce pérdidas que se mezclan con la recuperación del año siguiente y son difíciles de atribuir causalmente al evento.

Evento / Escala de Análisis	Pérdida Total Estimada para el Sector Ganadero del Carchi (USD/episodio)	Distribución de la Pérdida entre Tipos de Sistema (% del total provincial)	Costo de Inacción vs. Costo de Adaptación: Marco para el Cap. 12
	por anaerobiosis del suelo).		
Pérdida anualizada esperada (EAL; Expected Annual Loss; promedio ponderado de todos los eventos climáticos extremos por su frecuencia histórica)	EAL = USD 6,4 M/año (IC 95%: USD 4,8–8,2 M/año). Cálculo: (El Niño fuerte $\times$ $1/12 \text{ año}^{-1}$) + (El Niño moderado $\times$ $1/5 \text{ año}^{-1}$) + (La Niña fuerte $\times$ $1/10 \text{ año}^{-1}$) + (La Niña moderada $\times$ $1/4 \text{ año}^{-1}$) + (heladas severas $\times$ $2/\text{año}$) = USD 6,4 M/año en pérdidas esperadas del sector ganadero del Carchi.	La EAL de USD 6,4 M/año equivale al 3,9% del valor de producción anual del sector ganadero del Carchi (USD 164 M/año estimado para 2024) y al 41% del presupuesto anual de la Dirección Provincial del MAG-Carchi. El riesgo climático del sector ganadero del Carchi es un pasivo contingente público de magnitud comparable al presupuesto de la entidad encargada de gestionarlo.	El EAL es el indicador de referencia para el dimensionamiento del instrumento de seguro agropecuario climático del Cap. 13: una prima de seguro anual de USD 48–72/finca (el 0,7–1,1% del valor de producción anual de la finca promedio del corredor) financiaría un fondo de reservas que cubriría el 60–80% de los eventos El Niño moderado y fuerte en el Tipo I, con una relación actuarialmente viable.

Nota. Elaboración propia.

10.5.1 La EAL como Pasivo Contingente Público

La Pérdida Anualizada Esperada de USD 6,4 M/año para el sector ganadero del Carchi destaca como el dato clave de este capítulo desde una óptica de política pública. Este número representa el 41% del presupuesto anual de la Dirección Provincial del MAG-Carchi, que asciende a USD 15,6 M/año.

Esto implica que tanto el gobierno provincial como el nacional están asumiendo, de manera implícita, una carga contingente de USD 6,4 M/año relacionado con el riesgo climático en la ganadería, un pasivo que no se refleja de forma explícita en ningún documento financiero.

Cuando se compara con el costo del paquete de adaptación, la disparidad es notable. Se estima que implementar el paquete completo de adaptación para todas las fincas del corredor —que incluye fertilización fosfatada correctiva, encalado, pasturas mixtas, reservas de forraje y un sistema de alerta temprana— tendría un costo de entre USD 1,8 y 2,4 M/año, en términos de implementación y operación (detallado en el Cap. 12). La relación entre el costo anualizado de

la adaptación y la Pérdida Anualizada Esperada es de 1:2,7 a 1:3,6; esto significa que por cada dólar invertido en adaptación, se evitarían pérdidas esperadas de entre USD 2,7 y 3,6 anuales.

Este vínculo económico es la base del argumento a favor de la inversión en adaptación, un tema que se desarrolla más a fondo en los capítulos 12 y 13.

El riesgo climático ganadero del Carchi en perspectiva comparada

Magnitud: EAL de USD 6,4 M/año = 41% del presupuesto del MAG-Carchi = 3,9% del valor de producción del sector ganadero provincial

Comparación sectorial: el riesgo climático del sector ganadero es mayor que el del sector florícola del Carchi (EAL estimada USD 2,1 M/año) y similar al del sector papero (EAL estimada USD 7,2 M/año), pero tiene menor cobertura de seguros agrícolas (18% de las fincas ganaderas vs. 42% de las florícolas)

Comparación internacional: la EAL/valor de producción del 3,9% del sector ganadero del Carchi es mayor que la del sector ganadero lechero de Colombia (2,1%; Tapasco et al., 2015) y similar a la del sector ganadero de leche de Bolivia (4,2%; SENASAG, 2018), reflejando la mayor exposición al ENSO de los sistemas andinos de alta altitud.

Implicación: el riesgo climático del sector ganadero del Carchi no es asegurable a nivel individual (las pérdidas de USD 5.840/finca/episodio en el Tipo I superan la capacidad de pago de la prima de una cobertura actuarialmente neutra), sino que requiere mecanismos de gestión de riesgo paramétrico (seguro indexado) o fondos de contingencia públicos para ser manejable.

10.6 Modelo Econométrico de Panel: Los Determinantes Económicos del Ingreso Ganadero.

Tabla 50.

Modelo Econométrico de Panel con Efectos Fijos para los Determinantes del Ingreso Ganadero Mensual en el Corredor del Carchi ($n = 80 \text{ UPAs} \times 24 \text{ meses} = 1.920$ observaciones; variable dependiente: $\ln(\text{Ingreso_bruto_mensual})$)

Variable Independiente	Coefficiente Estimado (efectos fijos; β ; variable dependiente: $\ln(\text{Ingreso_bruto_mensual})$)	Intervalo de Confianza al 95% y Significancia Estadística	Interpretación Económica y Articulación con el SEM del Cap. 9
$\ln(L_leche_mensual)$ — producción mensual de leche (litros)	$\beta = +0,82$	IC95%: +0,74 a +0,90; $p < 0,001$	Una reducción del 1% en la producción de leche produce una reducción del 0,82% en el ingreso bruto mensual. La elasticidad ingreso-producción menor a 1 refleja que los ingresos no-leche (venta de animales) se compensan parcialmente cuando la producción de leche cae. El coeficiente es consistente con $\beta_{71} = 0,82$ del SEM del Cap. 9, confirmando la coherencia de los dos modelos.
$\ln(\text{Precio_leche})$ — precio mensual al productor (USD/L)	$\beta = +0,61$	IC95%: +0,52 a +0,70; $p < 0,001$	Una reducción del 1% en el precio de la leche produce una reducción del 0,61% en el ingreso bruto mensual. El menor coeficiente del precio vs. la producción ($0,61 < 0,82$) confirma el hallazgo central del SEM del Cap. 9: el ingreso responde más a la producción (que depende del suelo y el pastizal) que al precio (que depende del mercado). Consistente con $\beta_{72} = 0,61$ del SEM.
ONI_mensual — índice oceánico de El Niño (rezago 2 meses, variable instrumental para el clima)	$\beta = -0,094$	IC95%: -0,142 a -0,046; $p < 0,001$	Una unidad adicional de ONI (equivalente a un episodio El Niño moderado sostenido) reduce el ingreso mensual en el 9,4%, manteniendo constantes la producción de leche, el precio y el manejo. Este coeficiente captura el efecto directo del ENSO sobre el ingreso no mediado por la producción de leche: incluye el aumento de costos de suplementación, el descarte forzoso de ganado y otros impactos directos. Al combinarlo con el efecto indirecto a través de la producción de leche, el efecto total del ENSO sobre el ingreso es consistente con $\beta_{\text{total}} = -0,58$ del SEM.
SPI-3_mensual — índice de precipitación estandarizado (rezago 1 mes)	$\beta = +0,042$	IC95%: +0,018 a +0,066; $p < 0,01$	Una unidad adicional de SPI-3 (de -1 a 0, de sequía moderada a normal) aumenta el ingreso mensual en el 4,2%. La magnitud del coeficiente del SPI-3 es menor que la del ONI porque el SPI-3 captura solo el efecto de la precipitación (sin la temperatura), mientras que el ONI captura el efecto combinado de temperatura y precipitación del ENSO.

Variable Independiente	Coeficiente Estimado (efectos fijos; β ; variable dependiente: $\ln(\text{Ingreso_bruto_mensual})$)	Intervalo de Confianza al 95% y Significancia Estadística	Interpretación Económica y Articulación con el SEM del Cap. 9
			Consistente con el efecto total SPI-3→Ingreso del SEM.
Dummy_suplementación × ONI (interacción: ¿la suplementación amortigua el impacto del ENSO?)	$\beta_{\text{interacción}} = +0,068$	IC95%: +0,022 a +0,114; $p < 0,01$	Las fincas que suplementan sistemáticamente reducen el impacto del ENSO sobre el ingreso en 0,068 puntos porcentuales por unidad de ONI: el efecto negativo del ENSO sobre el ingreso es de $-0,094$ sin suplementación y de $-0,094 + 0,068 = -0,026$ con suplementación sistemática. La suplementación no elimina el impacto del ENSO pero lo reduce en un 72%. Este resultado cuantifica el retorno económico de la suplementación como instrumento de adaptación.
Tipo_sistema (efectos fijos de tipo de sistema en el modelo pooled)	Tipo II vs. Tipo I: $\beta = +0,42$; Tipo III vs. Tipo I: $\beta = +0,88$; Tipo IV vs. Tipo I: $\beta = +1,24$	Tipo II: IC95% +0,32 a +0,52; Tipo III: +0,74 a +1,02; Tipo IV: +1,08 a +1,40; todos $p < 0,001$	Los efectos fijos de tipo de sistema capturan las diferencias estructurales permanentes de ingreso entre tipos, que son independientes de la variabilidad climática interanual. El Tipo IV tiene un ingreso sistemáticamente un 1,24 log-puntos mayor que el Tipo I (equivalente a $e^{1,24} = 3,5\times$ más ingreso), consistente con la diferencia de producción de 3,5× de la Tabla 8.1.
R² within (varianza temporal dentro de cada finca explicada por el modelo); R² between (varianza entre fincas)	R ² within = 0,74; R ² between = 0,86; R ² overall = 0,82	Hausman test (efectos fijos vs. aleatorios): $\chi^2(6) = 38,4$; $p < 0,001$ → se prefiere el modelo de efectos fijos	El R ² within de 0,74 indica que el modelo captura el 74% de la variación temporal del ingreso dentro de las fincas, consistente con el R ² (Ingreso) = 0,86 del SEM del Cap. 9 (la diferencia se explica porque el SEM incluye las variables intermedias del suelo y el forraje que el modelo de panel no incluye explícitamente). El test de Hausman confirma la necesidad de efectos fijos (la heterogeneidad no observada entre fincas es correlacionada con los regresores).

Nota. Elaboración propia.

10.6.1 La Interacción Suplementación × ONI como el Resultado Más Operativo.

El coeficiente de la interacción entre la suplementación y el ONI ($\beta_{\text{interacción}} = +0,068$) representa el hallazgo más útil del modelo econométrico para la formulación de políticas. Esta

cifra resume de manera clara el argumento que el libro ha elaborado a lo largo de sus capítulos: la suplementación forrajera sistemática disminuye el impacto del ENSO en los ingresos de los ganaderos en un 72% (de -0,094 a -0,026).

En términos monetarios para el Tipo I durante un evento fuerte de El Niño, sin suplementación, la pérdida de ingresos durante ese periodo asciende a USD 3.820 (provenientes de la producción de leche). Sin embargo, si se implementa una suplementación sistemática antes del episodio, esa pérdida se reduciría a solo USD 1.100. La diferencia de USD 2.720 refleja el beneficio económico de la suplementación sistemática durante un fuerte evento de El Niño, y este debe contrastarse con el costo anual de dicha suplementación (USD 2.320 por finca al año para las fincas del Tipo I que ya están suplementando) para determinar el retorno de inversión de la suplementación como herramienta de adaptación, análisis que se desarrolla en el Capítulo 12.

Un aspecto para considerar en este cálculo es que supone que la suplementación planificada (que corresponde al 12% de las fincas del Tipo I que ya cuenta con este recurso) tiene la misma efectividad que la suplementación reactiva durante el evento. No obstante, los datos del monitoreo del proyecto sugieren que la suplementación planificada es más eficaz, ya que ayuda a mantener la condición corporal de las vacas antes del episodio, lo que disminuye el impacto de un balance energético negativo. Sin embargo, la información disponible no es suficiente para medir esa diferencia con exactitud.

El Capítulo 13 aconseja que los programas de suplementación para la adaptación sean establecidos de antemano, en lugar de ser reactivos, precisamente para aprovechar esa eficiencia adicional.

10.7 Síntesis del capítulo

- **Estructura de costos (Tabla 46):** El costo total por finca se sitúa en USD 7,120 para el Tipo I y se eleva a USD 65,460 para el Tipo IV. En cuanto al costo por litro producido, este es de USD 0.348 para el Tipo I y USD 0.198 para el Tipo IV. Aquí se observa un gradiente de 1.76 veces, lo que indica economías de escala y una mejor productividad. Respecto al margen entre precio y costo, se registra USD 0.072/L para el Tipo I y USD 0.222/L para el Tipo IV, mostrando un gradiente de 3.1 veces. Los componentes del costo variable incluyen mano de obra de 30 a 39%, y suplementación que varía entre 6.5 y 23.2% (indicando el

desacoplamiento del pastizal), además de que la alimentación-pastizal se mantiene en aproximadamente 20% en todos los tipos. También es relevante mencionar que el costo de intereses como porcentaje de los costos fijos aumenta con la tecnificación, pasando del 17% al 24%, lo que incrementa la vulnerabilidad del flujo de caja ante eventos como El Niño en el Tipo IV.

- **Márgenes económicos (Tabla 47):** El ingreso bruto total es de USD 10,990 para el Tipo I y USD 163,990 para el Tipo IV. En cuanto al margen neto, se reporta USD 3,870 al año para el Tipo I, lo que equivale a USD 322 al mes, cifra que está por debajo de la línea de pobreza urbana en Ecuador, en contraste con los USD 98,530 al año del Tipo IV. La rentabilidad sobre activos (ROA) también es notable: 3.2% para el Tipo I (inferior a la tasa bancaria del 4.5%) y 9.6% para el Tipo IV. Además, el 28% de las fincas del Tipo I se encuentran por debajo del punto de equilibrio en años de fase ENSO neutra, lo que denota una vulnerabilidad estructural no relacionada con el clima. Este aspecto es crucial para la formulación de políticas.
- **Pérdidas por evento climático (Tabla 48):** En un evento de El Niño fuerte, las pérdidas alcanzan los USD 5,840 por finca para el Tipo I, lo que equivale al 150% del margen neto anual. Desglosando estas pérdidas, encontramos que USD 3,820 corresponden a la reducción de producción de leche (65%), USD 1,120 a descarte forzoso (19%), USD 480 a suplementación adicional (8%) y USD 420 a un aumento en el costo de insumos (7%). Por otro lado, para un evento de La Niña fuerte, las pérdidas son de USD 2,840 por finca en el Tipo I, representando el 73% del margen neto anual. Cabe destacar que las pérdidas del Tipo I suelen ser mayores en porcentaje del margen neto en comparación con las del Tipo IV, aunque en valor absoluto son menores en el caso de un El Niño fuerte. El descarte forzoso, que tiene el costo real más elevado (USD 1,800 a 2,400 por vaca, incluyendo el periodo de adaptación de la reposición), suele aparecer como el más bajo en los registros de producción.
- **Pérdidas a escala provincial y EAL (Tabla 49):** Ante un fuerte evento de El Niño, las pérdidas se estiman en USD 38.4 millones $\pm$ 8.6 millones para el sector ganadero del Carchi; en un evento moderado, se proyectan pérdidas de USD 14.8 millones, y en un evento de La Niña fuerte, USD 18.6 millones. En cuanto a los EAL, se calcula en USD 6.4

millones al año (IC95%: USD 4.8 a 8.2 millones al año), lo que representa el 41% del presupuesto del MAG-Carchi y el 3.9% del valor de producción del sector. La relación entre el costo de adaptación y el EAL es de 1:2.7 a 3.6, y la relación entre el costo de adaptación por episodio y el costo de inacción por episodio es de 1:9.1 para un evento de El Niño fuerte.

-
- **Modelo econométrico de panel (Tabla 50):** Se presentan resultados con un R^2 dentro de 0.74 y un R^2 general de 0.82. Las elasticidades son: producción $\beta=+0.82$ y precio $\beta=+0.61$. Los coeficientes climáticos muestran que ONI $\beta=-0.094$ ($p<0.001$) y SPI-3 $\beta=+0.042$ ($p<0.01$). La interacción entre suplementación y ONI tiene un $\beta_{\text{interacción}}=+0.068$ ($p<0.10$). Estos hallazgos son consistentes con el SEM presentado en el Cap. 9, donde las elasticidades del modelo de panel se alinean con los coeficientes estandarizados del SEM.
- **Resultado central del capítulo:** El margen de USD 0.072/L del Tipo I es tan ajustado que, ante un evento de El Niño moderado (que implica una reducción del 24% en la producción), se convierte en una pérdida neta durante ese periodo. En un caso de El Niño fuerte, las pérdidas equivalen a 1.5 años de margen neto del ganadero de páramo en un único evento. Además, la EAL de USD 6.4 millones al año se presenta como una carga contingente pública no provisionada, lo que representa un argumento económico significativo para invertir en la adaptación climática del sector ganadero en Carchi.

CAPÍTULO 11

Impacto Económico de la Variabilidad Climática: Cuantificación y Escenarios

Tres escenarios climático-económicos al 2035 y 2050 con análisis de Valor Presente Neto, distribución de pérdidas e inequidad intra-corredor, punto de inflexión de inviabilidad del Tipo I en 2038–2041 bajo escenarios sin adaptación, y análisis de sensibilidad de cinco supuestos clave



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** los supuestos de los tres escenarios climático-económicos del capítulo — Conservador (SC), Tendencial (ST) y Acelerado (SA)— considerando la climática, la evolución del precio de la leche, costos de producción, la adopción de tecnologías de adaptación y la evolución genética del hato.
- **Cuantificar** el impacto económico proyectado al 2035 bajo los tres escenarios para el Tipo I, incluyendo la producción de leche, el ingreso bruto, el costo total, el margen neto y el Valor Presente Neto de las pérdidas acumuladas respecto al escenario contrafactual.

- **Determinar** el punto de inflexión de la viabilidad económica del sistema Tipo I bajo los subescenarios proyectados hasta 2050, mediante el análisis de la evolución del margen neto y del período disponible para la adopción de medidas de adaptación
- **Analizar** la distribución de las pérdidas económicas y las diferencias de vulnerabilidad entre los sistemas del corredor mediante indicadores de desigualdad, participación, variabilidad interanual del ingreso y persistencia de la actividad ganadera en el páramo al 2035.
- **Interpretar** los resultados del análisis de sensibilidad de cinco supuestos clave —tasa de descuento, precio de la leche al 2050, costo del paquete de adaptación, frecuencia de eventos El Niño fuerte y tasa de adopción— y concluir que el VAN de la adaptación moderada es positivo y robusto en todo el espacio de parámetros analizado.
- **Aplicar** el resultado más alentador del capítulo —el VAN positivo del escenario SA-B (+USD 12.600/finca al 2050 incluso bajo RCP 8.5)— como argumento de que la adaptación integral transforma un escenario climático catastrófico en uno de ganancias moderadas para el ganadero del páramo del corredor del Carchi.

11.1 Introducción: De la Cuantificación Histórica a la Prospectiva Económica.

En el Capítulo 10, se abordaron las pérdidas económicas históricas del sector ganadero en el corredor del Carchi, enfocándose en el costo que el riesgo climático ha implicado en el pasado. Ahora, el Capítulo 11 da un paso crucial, tanto lógica como políticamente necesario: se centra en cuantificar las pérdidas futuras considerando diferentes escenarios de cambio climático y las posibles respuestas adaptativas. Además, busca expresar estas pérdidas en términos de Valor Presente Neto, lo que permitirá una comparación más clara con los costos de inversión en adaptación que se discutirán en el Capítulo 12.

El análisis de los escenarios económicos hasta 2035 y 2050 sirve como un puente entre el diagnóstico biofísico presentado en los Capítulos 4 a 9 y las propuestas políticas que se encuentran en los Capítulos 13 y 14. Sin una estimación del impacto futuro, las propuestas de adaptación podrían parecer caras en términos absolutos. Sin embargo, es fundamental evaluarlas de manera relativa: ¿qué costo implica no adaptar? La respuesta que se ofrece en el Capítulo 11 es contundente: para el Tipo I, no adaptar bajo el escenario RCP 4.5 representaría un costo de USD 58,400 en Valor Presente Neto para 2050, mientras que una adaptación

moderada costaría solo USD 14,200 en pérdidas residuales, generando un beneficio neto de USD 44,200.

Este argumento económico se convierte en una herramienta poderosa para los responsables de la toma de decisiones en la política agropecuaria del Carchi. En lugar de utilizar un análisis de sensibilidad de un solo punto, el capítulo opta por un enfoque de análisis de escenarios, dado que la incertidumbre en las proyecciones climáticas para 2050 es tan grande que no se justifica una única estimación. Se plantean tres escenarios: Conservador, Tendencial y Acelerado. Es importante destacar que estos no son predicciones, sino marcos coherentes de supuestos que permiten explorar un rango de resultados posibles y, lo más relevante, identificar aquellos resultados que se mantienen consistentes a través de todos los escenarios.

El hallazgo más sólido de este capítulo es que el beneficio neto de la adaptación es positivo en todos los escenarios. Esto implica que la incertidumbre climática no debería ser vista como una razón para postergar la adaptación, sino más bien como un impulso para actuar de inmediato.

11.2 Marco Analítico de Escenarios: Dimensiones, Supuestos y Fuentes

11.2.1 La Arquitectura de los Tres Escenarios

En el Capítulo 11, los escenarios se presentan a través de cinco dimensiones que se definen por separado y luego se combinan para generar los resultados integrados que se encuentran en las Tablas 52 y 53.

Estas cinco dimensiones incluyen: (1) la trayectoria climática, que abarca tanto el RCP 4.5 como el RCP 8.5, además de la frecuencia de eventos extremos; (2) la evolución en el precio que reciben los productores de leche; (3) la evolución de los costos de producción; (4) la tasa a la que se adoptan tecnologías de adaptación; y (5) el avance genético del ganado.

Los valores de cada una de estas dimensiones para los diferentes escenarios están detallados en la Tabla 51.

Tabla 51.

*Marco Analítico de los Tres Escenarios Climático-Económicos del Capítulo 11:
Dimensiones, Supuestos y Fuentes Empíricas*

Dimensión del Escenario	Escenario Conservador (SC)	Escenario Tendencial (ST)	Escenario Acelerado (SA) — Supuestos y bases empíricas
Trayectoria climática (temperatura y precipitación al 2050; fuente: CMIP6 regionalizado)	RCP 4.5 (temperatura +1,1 °C / precipitación – 5% al 2050 en el corredor del Carchi)	RCP 4.5 con mayor frecuencia de eventos extremos: El Niño fuerte cada 8 años vs. 12 histórico; La Niña fuerte cada 7 años vs. 10 histórico; heladas severas +1,4 eventos/año	RCP 8.5 (temperatura +2,4 °C / precipitación –18% al 2050) + mayor frecuencia de extremos según proyecciones del CMIP6 para el norte de los Andes: El Niño fuerte cada 5 años; La Niña fuerte cada 5 años. Fuente: Vuille et al. (2018); Cai et al. (2021).
Evolución del precio de la leche al productor (USD/L; real constante de 2024)	Precio estable: USD 0,42/L en todo el horizonte (sin cambios reales de política de precios)	Precio con tendencia leve al alza: +0,8%/año real (refleja la dinámica histórica 2010–2024 de +0,6–1,2%/año real)	Precio con tendencia alcista moderada: +1,4%/año real (escenario de mejora de la cadena de valor láctea con mayor poder de negociación colectiva de los ganaderos; coherente con el objetivo de política del Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible 2023–2030 del MAGAP).
Evolución del costo de producción (USD/L real constante de 2024)	Costo estable: USD 0,348/L en todo el horizonte (sin cambios en manejo ni en estructura de costos)	Costo con tendencia al alza: +0,6%/año real (refleja el aumento histórico de los costos de insumos ganaderos: fertilizantes, medicamentos, energía)	Costo con tendencia moderada al alza: +1,2%/año real (escenario de mayor presión de costos por el cambio climático: mayor necesidad de suplementación, mayores costos de sanidad en condiciones de estrés hídrico, mayor costo del forraje en años extremos).
Tasa de adopción de tecnologías de adaptación por los ganaderos del Tipo I	0% (ningún ganadero adopta tecnologías nuevas; escenario de inacción completa; representa el peor caso desde la perspectiva del bienestar ganadero)	20% al 2035; 40% al 2050 (tasa de difusión moderada, coherente con la adopción histórica de tecnologías agropecuarias en el corredor del Carchi según el INIAP)	60% al 2035; 85% al 2050 (tasa de adopción acelerada condicionada a la implementación de los instrumentos de política del Cap. 13: subsidio parcial a la fertilización fosfatada, seguro climático dual, sistema de alerta temprana operativo).
Evolución de la estructura del hato (composición genética y número de vacas por finca)	Sin cambio genético; descarte forzoso acumulado por eventos climáticos reduce el número	Mejoramiento genético gradual: aumento del potencial de producción en +0,4 L/vaca/año (refleja el programa	Mejoramiento genético acelerado: +0,8 L/vaca/año (con inseminación artificial subsidiada y banco de germoplasma de razas adaptadas al páramo de alta altitud; programa conjunto INIAP-UPEC-GAD Carchi).

Dimensión del Escenario	Escenario Conservador (SC)	Escenario Tendencial (ST)	Escenario Acelerado (SA) — Supuestos y bases empíricas
	de vacas en ordeño del Tipo I en -1,8% anual acumulado	MAGAP-UPEC de mejoramiento genético del ganado de páramo)	

Nota. Los valores correspondientes a precios, costos, tasas de adopción, evolución del hato y mejoramiento genético constituyen supuestos de simulación contruidos para los escenarios económico-climáticos del estudio

11.2.2 La Metodología del Valor Presente Neto

El impacto económico de cada escenario se presenta como el Valor Presente Neto (VAN) de los flujos de ingreso neto del ganadero durante el período de 2025 a 2050, utilizando una tasa de descuento del 8% anual. Esta tasa del 8% se alinea con varios factores: (1) el costo de oportunidad del capital en el sector agropecuario en Ecuador, donde la tasa de rendimiento de las inversiones en tierras agrícolas se sitúa entre el 7% y el 9% anual en la región andina, según el Banco del Estado en 2023; (2) la tasa de interés del crédito de desarrollo que BanEcuador ofrece para el sector ganadero, que es del 8,5% anual en 2024; y (3) el rango comúnmente utilizado en los análisis de inversión para la adaptación climática dentro del sector agropecuario en América Latina, que varía entre el 5% y el 10%, según el Banco Mundial en 2010.

Para calcular el VAN de las pérdidas, el contrafactual es un escenario hipotético sin los efectos adicionales del cambio climático en comparación con el clima del período de 1990 a 2020. Esto implica la producción que el ganadero habría logrado si las condiciones climáticas se hubieran mantenido estables. La diferencia entre el VAN del escenario afectado por el cambio climático y el VAN del contrafactual representa la pérdida de bienestar ganadero atribuida a este fenómeno. Este método es común en la literatura relacionada con la economía del cambio climático, como lo indican estudios de Dell et al. (2012) y Burke et al. (2015).

11.3 Impacto Económico Proyectado al 2035: El Horizonte de Política de Corto Plazo

Tabla 52.

Económico Proyectado al 2035 bajo los Tres Escenarios Climático-Económicos para el Tipo I del Corredor del Carchi

Indicador Económico — Tipo I (Páramo Extensivo) al Horizonte 2035	Escenario Conservador (SC): RCP 4.5 sin adaptación	Escenario Tendencial (ST): RCP 4.5 con adaptación moderada	Escenario Acelerado (SA): RCP 8.5 con adaptación integral — Diferencia SA–SC y palancas explicativas
Producción de leche media (L/vaca/día; 2035)	6,6 L/vaca/día (–11% respecto al basal 2024 de 7,4 L; el cambio climático reduce la PPNA un 8,7% y la PC del forraje 2,2 pp → reducción de producción de leche; sin compensación por adaptación)	7,7 L/vaca/día (+4% respecto al basal; la adaptación moderada —pasturas mixtas + fertilización fosfatada correctiva— compensa la reducción climática y añade una ganancia neta de producción)	8,4 L/vaca/día (+14% respecto al basal; la adaptación integral —paquete básico + mejoramiento genético + seguro climático— produce ganancias mayores que compensan el mayor impacto del RCP 8.5; diferencia SA–SC: +1,8 L/vaca/día.
Ingreso bruto anual por venta de leche (USD/finca/año; 2035)	USD 8.310 ± 1.840 (–13% respecto al basal de USD 9.510; combinación de menor producción de leche –11% y precio estable)	USD 11.220 ± 2.160 (+18% respecto al basal; mayor producción +4% × precio al alza +1,4%/año acumulado × 11 años = precio 2035 de USD 0,48/L × 7,7 L/día × 365 días × 8,4 vacas)	USD 14.580 ± 2.480 (+53% respecto al basal; diferencia SA–SC: +USD 6.270/finca/año; la diferencia entre los dos escenarios extremos al 2035 equivale a 1,6 veces el margen neto anual basal del Tipo I.
Costo total de producción (USD/finca/año; 2035)	USD 7.900 ± 1.120 (+11% respecto al basal de USD 7.120; el aumento de costos sin adaptación refleja el mayor gasto en suplementación de emergencia durante los eventos extremos más frecuentes y el mayor costo de reposición del ganado descartado)	USD 9.640 ± 1.280 (+35% respecto al basal; incluye el costo del paquete de adaptación moderada: USD 480–640/finca/años adicionales en fertilización fosfatada + encalado + semilla de pasturas mixtas)	USD 11.280 ± 1.480 (+58% respecto al basal; incluye el costo del paquete integral: USD 1.280–1.640/finca/años adicionales en paquete básico + inseminación artificial + prima del seguro climático).
Margen neto (USD/finca/año; 2035)	USD 410 ± 720 (–89% respecto al basal de USD 3.870; el margen neto casi desaparece; el 68% de las fincas del Tipo I opera por debajo del punto de equilibrio al 2035 bajo SC; el 28% estructuralmente inviable de hoy se	USD 1.580 ± 840 (–59% respecto al basal; la adaptación modera la pérdida pero no la evita completamente porque el costo del paquete de adaptación absorbe parte de la ganancia de producción; el 42% de las fincas del Tipo I sigue por debajo del	USD 3.300 ± 960 (–15% respecto al basal 2024; la adaptación integral casi neutraliza el impacto del cambio climático en el margen neto; el 32% de las fincas sigue por debajo del punto de equilibrio porque el 28% estructuralmente

Indicador Económico — Tipo I (Páramo Extensivo) al Horizonte 2035	Escenario Conservador (SC): RCP 4.5 sin adaptación	Escenario Tendencial (ST): RCP 4.5 con adaptación moderada	Escenario Acelerado (SA): RCP 8.5 con adaptación integral — Diferencia SA–SC y palancas explicativas
	convierte en el 68% al 2035 sin adaptación)	punto de equilibrio al 2035)	inviabile del basal no puede ser recuperado solo con adaptación climática).
Pérdida acumulada de bienestar ganadero 2025–2035 (VAN de la diferencia ST–SC; tasa de descuento 8%)	VAN(ST–SC) = USD 14.280/finca (el valor presente de la ganancia de adoptar el escenario tendencial vs. conservador durante 10 años es de USD 14.280, consistente con la relación 1:9,1 del Cap. 10 porque la adaptación del ST cuesta USD 1.560 en VAN y produce USD 14.280 en beneficios)	Referencia: VAN(SC) de las pérdidas brutas del Tipo I durante 2025–2035 = –USD 24.640/finca (diferencia de ingresos acumulados con el escenario sin cambio climático ni adaptación)	VAN(SA–SC) = USD 36.840/finca (el valor presente de adoptar el escenario acelerado vs. conservador durante 10 años; la mayor parte de la diferencia proviene de la adaptación integral, no de la trayectoria climática más severa del RCP 8.5).

Nota. Elaboración propia.

11.3.1 El Año 2035 como Horizonte de Decisión de la Política Actual

La mirada hacia el 2035 es crucial para orientar las decisiones en la política agropecuaria. Los instrumentos que diseñen e implementen el MAG, el GAD Carchi y el INIAP ahora tendrán su mayor impacto entre 2025 y 2035. Las proyecciones para el 2035 indican que el espacio de acción se está reduciendo rápidamente.

En el Escenario Conservador, el margen neto que recibe un ganadero del Tipo I se desploma del 89%, bajando de USD 3.870 a solo USD 410. Por otro lado, en el Escenario Tendencial con una adaptación moderada, aunque también hay una caída, es menos drástica, con una reducción del 59%. En el Escenario Acelerado, que considera una adaptación integral, el margen neto se ve afectado en solo un 15%.

Lo que realmente destaca entre estos escenarios para 2035 no es la trayectoria climática, que permanece constante (RCP 4.5, tanto para el SC como para el ST), sino cómo se adopta la adaptación. Tanto el SC como el ST siguen la misma trayectoria climática, pero el margen neto que generan es muy distinto (USD 410 frente a USD 1.580 en el Tipo I).

Esto refuerza el mensaje central del libro: al llegar al 2035, la capacidad de adaptación será el factor clave para la viabilidad del sistema del páramo, mucho más que la trayectoria de las emisiones globales, sobre la cual el ganadero del Carchi no tiene control alguno.

"Antes me preocupaba el clima. Ahora entiendo que el problema no es solo el clima —es lo que hacemos o dejamos de hacer antes de que llegue el mal tiempo. El clima me va a afectar igual. Lo que cambia es cuánto." (Testimonio de ganadero del Tipo I, cantón Mira, taller de devolución de resultados del proyecto, septiembre 2024).

11.4 Impacto Económico al 2050: El Largo Plazo y el Punto de Inflexión

Tabla 53.
Impacto Económico Proyectado al 2050 bajo Cuatro Sub-Escenarios para el Tipo I del Corredor del Carchi, con Punto de Inflexión de Inviabilidad Económica

Indicador / Horizonte 2050	SC: RCP 4.5 sin adaptación	ST: RCP 4.5 con adaptación moderada (40% de adopción al 2050)	SA-A: RCP 8.5 sin adaptación	SA-B: RCP 8.5 con adaptación integral (85% adopción) — Síntesis e implicaciones
Producción media de leche (L/vaca/día; Tipo I al 2050)	5,8 L/vaca/día (–22% respecto al basal 2024; la tendencia de reducción de PPNA del –15,7% al 2050 bajo RCP 4.5 más la reducción de la calidad del forraje se traduce en pérdida de producción sin compensación adaptativa)	8,8 L/vaca/día (+19% respecto al basal; la adaptación moderada + el ligero calentamiento que mejora la PPNA en las cotas más bajas del Tipo I producen ganancias netas de producción a largo plazo)	4,6 L/vaca/día (–38%; cruza el umbral de inviabilidad económica al precio actual de USD 0,42/L: el costo de producción a ese nivel de productividad supera el ingreso posible; el Tipo I deja de ser viable bajo SA-A)	9,2 L/vaca/día (+24%; el mismo paquete de adaptación integral que en ST pero aplicado sobre el escenario RCP 8.5 produce ganancias de producción mayores porque el calentamiento compensa parcialmente la reducción de precipitación en las cotas más bajas del Tipo I; diferencia SA-B vs. SA-A: +4,6 L/vaca/día.
Margen neto (USD/finca/año; Tipo I al 2050; precio 2050)	–USD 820 ± 1.240 (negativo: en promedio las fincas del Tipo I pierden dinero en 2050 bajo	USD 4.840 ± 1.120 (+25% respecto al basal 2024 de USD 3.870; la	–USD 3.640 ± 1.680 (pérdidas profundas; la ganadería del Tipo I bajo SA-	USD 6.280 ± 1.360 (+62% respecto al basal 2024; el escenario de

Indicador / Horizonte 2050	SC: RCP 4.5 sin adaptación	ST: RCP 4.5 con adaptación moderada (40% de adopción al 2050)	SA-A: RCP 8.5 sin adaptación	SA-B: RCP 8.5 con adaptación integral (85% adopción) — Síntesis e implicaciones
estimado bajo cada escenario)	SC; el 76% de las fincas opera por debajo del punto de equilibrio; el margen neto cruza cero para el productor promedio entre 2038–2044 bajo SC)	adaptación moderada no solo preserva el margen sino que lo aumenta; el 28% de las fincas sigue por debajo del punto de equilibrio — el mismo que en el basal, indicando que la adaptación moderada elimina el componente climático de la inviabilidad pero no el estructural)	A es financieramente insostenible para el 100% de las fincas al 2050; el punto de inflexión de inviabilidad se alcanza entre 2038–2045 según el escenario de frecuencia de El Niño fuerte)	mayor calentamiento + mayor adaptación produce los mayores márgenes netos al 2050 porque la adaptación integral es más eficiente bajo RCP 8.5 que bajo RCP 4.5 —la mayor presión climática activa más intensamente los mecanismos de mejora genética y de fertilidad del suelo que el paquete de adaptación integral promueve).
Porcentaje de fincas del Tipo I por debajo del punto de equilibrio al 2050	76% (de 28% basal; la inviabilidad estructural se expande dramáticamente sin adaptación; la ganadería del páramo como sector viable desaparece en esencia al 2050 bajo SC)	28% (igual que el basal 2024; la adaptación moderada es suficiente para preservar la viabilidad del segmento estructuralmente viable del Tipo I pero no para recuperar el segmento estructuralmente inviable)	100% (el Tipo I como sector es completamente inviable económicamente al 2050 bajo SA-A; esto implica un proceso de abandono de tierras del páramo con consecuencias ambientales graves —los páramos son ecosistemas de alta sensibilidad cuya perturbación por abandono o conversión tiene	22% (menor que el basal del 28%; la adaptación integral al 2050 bajo RCP 8.5 logra recuperar una parte del segmento estructuralmente inviable del basal — aproximadamente el 6% de las fincas del Tipo I que estaban por debajo del punto de equilibrio en 2024 son rentables al 2050 gracias al mejoramiento genético y la

Indicador / Horizonte 2050	SC: RCP 4.5 sin adaptación	ST: RCP 4.5 con adaptación moderada (40% de adopción al 2050)	SA-A: RCP 8.5 sin adaptación	SA-B: RCP 8.5 con adaptación integral (85% adopción) — Síntesis e implicaciones
			consecuencias hidrológicas provinciales y nacionales)	mayor fertilidad del suelo).
Pérdida acumulada de bienestar ganadero 2025–2050 (VAN de las pérdidas respecto al contrafactual sin cambio climático; tasa de descuento 8%; por finca del Tipo I)	VAN = –USD 58.400 ± 12.800/finca (valor presente de las pérdidas del ganadero del Tipo I entre 2025 y 2050 bajo SC respecto al contrafactual sin cambio climático; equivale a 15,1 veces el margen neto anual basal del Tipo I)	VAN = –USD 14.200 ± 3.600/finca bajo ST (–USD 22.400 bruto de pérdidas climáticas, recuperado en +USD 8.200 de ganancias netas de adaptación; el beneficio neto de la adaptación moderada es USD 44.200 por finca en VAN al 2050 respecto al SC)	VAN = –USD 124.800 ± 28.400/finca bajo SA-A (la pérdida acumulada al 2050 bajo el peor escenario es de 32,2 veces el margen neto anual basal; incluyendo el valor de liquidación del hato —el ganadero que abandona la actividad entre 2038–2044 recupera parte del capital en activos fijos— la pérdida neta es menor pero igualmente catastrófica)	VAN = +USD 12.600 ± 2.800/finca bajo SA-B (positivo: el valor presente del flujo de beneficios de la adaptación integral bajo RCP 8.5 supera el valor presente de las pérdidas climáticas; el ganadero del Tipo I que adopta el paquete integral resulta con un VAN positivo al 2050 incluso bajo el escenario de mayor calentamiento; este es el resultado más alentador del libro: la adaptación integral transforma un escenario catastrófico en uno de ganancias moderadas).
Punto de inflexión de inviabilidad económica del Tipo I (año en que el margen neto promedio cruza cero de	2041 ± 4 años bajo SC (RCP 4.5 sin adaptación)	No hay cruce del margen neto en el horizonte 2025–2050 bajo ST	2038 ± 3 años bajo SA-A (RCP 8.5 sin adaptación); el intervalo de confianza incluye 2028 si la frecuencia de	No hay cruce del margen neto en el horizonte 2025–2050 bajo SA-B El mensaje de política central: la ventana para evitar el punto de

Indicador / Horizonte 2050	SC: RCP 4.5 sin adaptación	ST: RCP 4.5 con adaptación moderada (40% de adopción al 2050)	SA-A: RCP 8.5 sin adaptación	SA-B: RCP 8.5 con adaptación integral (85% adopción) — Síntesis e implicaciones
manera permanente)			El Niño fuerte aumenta al 50% proyectado por el CMIP6	inflexión de inviabilidad es de 12–17 años dependiendo del escenario climático y de adaptación; las decisiones de inversión en adaptación de los próximos 5–7 años son determinantes.

Nota. Elaboración propia.

11.4.1 El Escenario SA-B: Por qué la Adaptación Integral Convierte la Catástrofe en Oportunidad

El hallazgo más sorprendente —y esperanzador— de la Tabla 11.3 es que el Valor Actual Neto (VAN) del escenario SA-B resulta positivo (+USD 12.600 por finca para 2050), incluso bajo la trayectoria climática más extrema (RCP 8.5). Esto indica que el ganadero del Tipo I que adopta un paquete completo de adaptación verá una mejora económica en 2050 en comparación con 2024, a pesar del aumento de temperatura y la mayor frecuencia de eventos climáticos severos.

¿Cómo se lleva a cabo? Lo que sucede dependerá de la influencia que conjugue las condiciones térmicas proyectadas con la capacidad de adaptarse de los sistemas ganaderos. En algunos lugares de menor altitud del Tipo I (2.200–2.600 msnm), donde las bajas temperaturas operan como un posible parámetro limitante para el crecimiento del pasto, un ligero incremento de la temperatura del ambiente podría hacer posible una mejora de la productividad forrajera, mientras no se vea acompañada por déficits hídricos que superen la capacidad de respuesta de la fotomáquina. Sin embargo, bajo posibles escenarios de mayor calentamiento, como es el caso del RCP 8.5, este posible efecto debe ser interpretado con cautela y, además, en conjunto con respecto a los cambios también proyectados de la precipitación y las frecuencias de los eventos extremos; eso sí, esto permitiría aprovechar la planta de las condiciones favorables pero también reducir la vulnerabilidad frente a posibles efectos climatológicos indeseables, en

eso aportan el mejoramiento genético, el manejo eficaz de la fertilización y la diversificación de las pasturas

Sin embargo, estos resultados deben interpretarse con cautela. No significa que el cambio climático sea favorable para la ganadería de los páramos; de hecho, los escenarios SA-A (RCP 8.5 sin adaptación) muestran una devastación económica. Lo que sí revela es que una adaptación integral puede transformar un desafío climático en una oportunidad de reformulación productiva para aquellos ganaderos dispuestos a implementarla.

Por lo tanto, la pregunta clave no es si la adaptación es económicamente viable (pues el VAN es positivo en todos los escenarios), sino cómo podemos facilitar su adopción entre los ganaderos del Tipo I, quienes actualmente enfrentan mayores limitaciones financieras y técnicas. Esa es la cuestión que abordan los Capítulos 12 y 13.

11.5 Distribución de Pérdidas e Inequidad Intra-Corredor

Tabla 54.

Distribución de las Pérdidas Climáticas e Inequidad Intra-Corredor al 2035 bajo los Escenarios Conservador y Tendencial: Coeficiente de Gini, Ratio de Vulnerabilidad, CV del Ingreso e Índice de Persistencia Ganadera del Páramo

Dimensión de la Distribución	Escenario Conservador (SC) al 2035	Escenario Tendencial (ST) al 2035	Interpretación y Relevancia para la Equidad de las Políticas de Adaptación
Coeficiente de Gini del ingreso ganadero intra-corredor (medida de desigualdad entre fincas; 0=igualdad perfecta; 1=máxima desigualdad)	Gini 2035 (SC) = 0,68 (vs. Gini basal 2024 = 0,62); el cambio climático sin adaptación aumenta la desigualdad intra-corredor porque afecta más severamente al Tipo I (menor margen) que al Tipo IV (mayor margen y mayor capacidad de amortiguamiento)	Gini 2035 (ST) = 0,58 (menor que el basal 2024 = 0,62); la adaptación moderada reduce la desigualdad porque los instrumentos de política del escenario tendencial están focalizados en el Tipo I (el segmento más vulnerable), mejorando su posición relativa respecto al Tipo IV	Un aumento del Gini sin adaptación (de 0,62 a 0,68 en 10 años) es estadísticamente pequeño pero económicamente significativo: en el contexto de una provincia con alta dependencia de la ganadería lechera, el aumento de la desigualdad intra-sectorial contribuye a la despoblación rural del páramo y a la concentración de la tierra en los sistemas más tecnificados.
Porcentaje del impacto climático	Tipo I absorbe el 24% de las	Tipo I absorbe el 12% de las	La asimetría de vulnerabilidad (el Tipo I absorbe una proporción

Dimensión de la Distribución	Escenario Conservador (SC) al 2035	Escenario Tendencial (ST) al 2035	Interpretación y Relevancia para la Equidad de las Políticas de Adaptación
total absorbido por el Tipo I vs. su participación en la producción provincial	pérdidas climáticas totales del sector (Tabla 10.4: USD 9,2 M de USD 38,4 M durante El Niño fuerte) pero solo representa el 8,4% de la producción provincial; ratio de vulnerabilidad-participación: 2,9× (el Tipo I pierde 2,9 veces más de lo que le correspondería en proporción a su producción)	pérdidas bajo ST (la adaptación focalizada en el Tipo I reduce su ratio de vulnerabilidad-participación de 2,9× a 1,4×)	desproporcionada del impacto climático) es el argumento principal de equidad para la focalización de los instrumentos de adaptación en el Tipo I. Un seguro climático proporcional a la producción (como los que típicamente diseñan las aseguradoras) sería inequitativo: compensaría más al Tipo IV (mayor producción) y menos al Tipo I (menor producción, pero mayor vulnerabilidad relativa).
Coeficiente de variación del ingreso ganadero interanual (CV; indicador de la volatilidad climática del ingreso)	CV(Ingreso) Tipo I al 2035 (SC) = 52% (vs. 38% basal 2024; el cambio climático aumenta la volatilidad interanual del ingreso del ganadero del páramo porque la mayor frecuencia de eventos extremos produce años de muy bajo ingreso más seguido)	CV(Ingreso) Tipo I al 2035 (ST) = 28% (la adaptación moderada reduce la volatilidad a niveles inferiores al basal gracias a las reservas de forraje y la fertilización de contingencia que amortiguan los peores años)	La reducción del CV del ingreso (de 52% a 28%) es uno de los beneficios más importantes de la adaptación para el bienestar de las familias ganaderas del páramo: un ganadero con CV = 52% no puede planificar inversiones a más de 1–2 años de horizonte (cualquier plan puede ser destruido por el siguiente evento extremo), mientras que un CV = 28% permite horizontes de planificación de 3–5 años que son necesarios para inversiones de mejoramiento genético o de infraestructura que mejoran la productividad a largo plazo.
Índice de Persistencia Ganadera del Páramo (IPP; porcentaje de ganaderos del Tipo I que continúan en actividad al 2035 vs. 2024; proxy de la sostenibilidad social del sistema)	IPP(SC) = 72% (el 28% de los ganaderos del Tipo I habría abandonado la actividad al 2035 bajo SC, principalmente los que ya eran estructuralmente inviables en 2024 y los que son	IPP(ST) = 91% (la adaptación moderada reduce el abandono del páramo del 28% al 9%; el 9% restante corresponde principalmente al segmento estructuralmente inviable que no	El IPP es el indicador que conecta el impacto climático con la sostenibilidad social y ecológica del páramo: la pérdida del 28% de los ganaderos bajo SC no es solo un problema económico individual —es una amenaza a los servicios ecosistémicos del páramo (regulación hídrica, captura de carbono, biodiversidad) que dependen del mantenimiento de

Dimensión de la Distribución	Escenario Conservador (SC) al 2035	Escenario Tendencial (ST) al 2035	Interpretación y Relevancia para la Equidad de las Políticas de Adaptación
	golpeados por dos o más eventos El Niño durante el período; el abandono del páramo tiene consecuencias ecológicas graves por la pérdida de servicios ecosistémicos)	puede ser recuperado solo con instrumentos de adaptación climática)	una ganadería extensiva de baja presión sobre el ecosistema.

Nota.. Elaboración propia.

11.5.1 La Inequidad Climática: El Tipo I Paga la Factura del Clima que Menos Ha Contribuido a Generar

El índice de vulnerabilidad y participación del Tipo I, que se sitúa en $2,9\times$ bajo el Escenario Conservador, nos ofrece una visión clara de la justicia climática en este análisis. El sistema del páramo, aunque logra absorber un 24% de las pérdidas causadas por el cambio climático, solo representa el 8,4% de la producción. Esto resalta una realidad preocupante: los ganaderos de la zona alta del páramo son quienes menos han contribuido al cambio climático. Tienen menores emisiones de gases de efecto invernadero por vaca, generan menos emisiones por hectárea en comparación con los sistemas más intensivos y, además, cuentan con una mayor captura de carbono en sus suelos.

Sin embargo, son precisamente ellos quienes sufren más en proporción a su producción. Esta desigualdad tiene un impacto directo en cómo se diseñan los instrumentos de adaptación. Por ejemplo, un seguro agropecuario climático que se basara en la producción, como comúnmente hacen las aseguradoras privadas, beneficiaría más al Tipo IV, que produce y pierde más en términos absolutos, mientras que el Tipo I recibiría menos, a pesar de que su pérdida es más significativa en relación a su margen.

Para abordar esta falta de equidad, el Capítulo 13 propone un modelo de seguro que utiliza un índice de compensación basado en la pérdida relativa al margen neto, en lugar de basarse solo en las pérdidas absolutas. Esta metodología asegura que los ganaderos del páramo obtengan una compensación que refleje la gravedad del impacto en su viabilidad económica.

"Nosotros los del páramo no hemos quemado petróleo. No hemos puesto fábricas. Y sin embargo somos los primeros en recibir el castigo del clima que

se descompone. Eso no parece justo." (Testimonio de ganadero del Tipo I, cantón Tulcán, asamblea de ganaderos del Carchi, noviembre 2023).

11.6 Análisis de Sensibilidad: La Robustez del Beneficio Neto de la Adaptación

Tabla 55.

Análisis de Sensibilidad del VAN del Beneficio Neto de la Adaptación Moderada (Escenario ST vs. SC) al 2050 para el Tipo I: Impacto de Cinco Supuestos Clave

Supuesto Analizado en el Análisis de Sensibilidad	Valor Base (escenario ST)	Rango de Variación Analizado	Impacto sobre el VAN del Tipo I al 2050 y Conclusión de Robustez
Tasa de descuento (refleja el valor del tiempo y la preferencia de los ganaderos por el presente)	8%	4% – 12%	VAN(ST–SC) a 4%: +USD 62.400/finca; a 8%: +USD 44.200/finca; a 12%: +USD 31.800/finca. El beneficio neto de la adaptación es positivo en todo el rango analizado; la conclusión de que la adaptación moderada es rentable es robusta a la tasa de descuento utilizada. A mayor tasa de descuento, los beneficios a largo plazo (al 2050) pesan menos, pero los beneficios a corto plazo (reducción de pérdidas por El Niño moderado en los próximos 5–10 años) son igualmente significativos.
Precio de la leche al productor al 2050 (USD/L real constante 2024)	USD 0,52/L (bajo ST con +1,4%/año × 26 años)	USD 0,38/L (precio cae en términos reales) – USD 0,68/L (precio sube aceleradamente por mayor demanda regional)	VAN(ST–SC) a precio USD 0,38/L: +USD 28.400/finca (positivo; la adaptación sigue siendo rentable incluso si el precio cae); a USD 0,68/L: +USD 72.600/finca. El umbral de precio por debajo del cual el VAN de la adaptación moderada se vuelve negativo es USD 0,29/L, muy por debajo del precio históricamente más bajo registrado en el corredor (USD 0,36/L en 2019).
Costo del paquete de adaptación moderada (USD/finca/años adicionales sobre el costo base)	USD 560/finca/año (fertilización fosfatada + encalado + pasturas mixtas)	USD 280/finca/año (subsidio del 50% al costo del paquete) – USD 1.120/finca/año (doble del costo base)	VAN(adaptación) a USD 280/finca/año: +USD 52.600/finca; a USD 1.120/finca/año: +USD 28.400/finca. El VAN de la adaptación es positivo en todo el rango analizado. El umbral de costo por encima del cual el VAN se vuelve negativo es USD 2.840/finca/año, más de 5 veces el costo base estimado; la rentabilidad de la adaptación es robusta a variaciones muy grandes en el costo del paquete.

Supuesto Analizado en el Análisis de Sensibilidad	Valor Base (escenario ST)	Rango de Variación Analizado	Impacto sobre el VAN del Tipo I al 2050 y Conclusión de Robustez
Frecuencia de eventos El Niño fuerte al 2050 (período de retorno)	Cada 8 años (ST: tendencial, basado en las proyecciones CMIP6 para el norte de los Andes)	Cada 12 años (sin aumento de frecuencia vs. histórico) – Cada 5 años (aumento acelerado según el extremo alto de las proyecciones CMIP6; Cai et al., 2021)	VAN(ST–SC) a frecuencia histórica (cada 12 años): +USD 36.800/finca; a cada 8 años (base): +USD 44.200/finca; a cada 5 años: +USD 58.600/finca. La inversión en adaptación es más rentable cuanto mayor es la frecuencia de eventos extremos: el VAN de la adaptación aumenta con la frecuencia del riesgo porque el paquete de adaptación reduce las pérdidas en cada evento. Este resultado refuerza la urgencia de implementar la adaptación pronto, antes de que la mayor frecuencia de extremos materialice sus pérdidas.
Tasa de adopción del paquete de adaptación moderada por los ganaderos del Tipo I al 2035	20% (base del escenario ST)	5% (adopción muy lenta) – 40% (adopción acelerada)	VAN(corredor, ST–SC) a 5% de adopción: USD 28,4 M total (solo el 25% del beneficio potencial se materializa); a 20%: USD 112,8 M; a 40%: USD 225,6 M. El beneficio total a escala del corredor es muy sensible a la tasa de adopción: duplicar la adopción (de 20% a 40%) duplica el beneficio. Este resultado justifica la inversión en los instrumentos de difusión y subsidio del paquete de adaptación (extensión agropecuaria, crédito preferencial, subsidios a insumos) porque cada punto porcentual adicional de adopción genera USD 5,6 M adicionales de beneficios en VAN para el sector.

Nota. Elaboración propia.

11.6.1 El Resultado Más Robusto: La Adaptación Siempre Paga

El hallazgo más importante del análisis de sensibilidad que se presenta en la Tabla 11.5 es que el Valor Actual Neto (VAN) de la adaptación moderada se mantiene positivo en todo el rango de parámetros evaluados. Para que la adaptación deje de ser rentable, el precio de la leche tendría que bajar a USD 0,29 por litro, lo que representa una caída del 31% respecto al precio actual de USD 0,42 por litro. Sin embargo, esta reducción nunca ha sido observada en la historia del sector lácteo en el corredor del Carchi.

Además, el costo del paquete de adaptación tendría que ser más de cinco veces superior al valor base estimado para que el VAN se tornara negativo. Este escenario de sobreestimación de

costos está muy por encima de cualquier variación que se considere razonable. Este resultado robusto responde a uno de los argumentos más comunes en contra de la inversión en adaptación climática: la incertidumbre. Si el beneficio de la adaptación solo fuera positivo bajo supuestos extremadamente favorables, entonces la incertidumbre podría ser un motivo válido para retrasar la decisión.

No obstante, el hecho de que el VAN sea positivo en todo el conjunto de parámetros analizados indica que la incertidumbre no altera la conclusión: adaptar es rentable en prácticamente cualquier escenario razonable de precios, costos y condiciones climáticas. La única razón que surge del análisis para no llevar a cabo la adaptación es la falta de acceso al capital necesario para financiar la inversión inicial. Por esta razón, el Capítulo 13 propone un conjunto de instrumentos financieros, como crédito preferencial, subsidios parciales y seguros climáticos, que buscan reducir esa barrera.

11.7 El Mapa de Urgencia de Adaptación: Dónde, Cuándo y Cuánto

11.7.1 La Geografía del Riesgo Climático Económico al Interior del Tipo I

El análisis de los escenarios muestra que el impacto económico del clima no es igual para todos dentro del Tipo I. Los ganaderos que se encuentran en las altitudes más elevadas del páramo, entre 3.600 y 4.000 msnm, son los que más sufren por la disminución de la calidad del forraje. Esto se debe a que el kikuyo que crece a esas altitudes es más sensible a la temperatura del suelo en comparación con el kikuyo que se encuentra a altitudes más bajas.

Por otro lado, los ganaderos situados en las cotas más bajas del Tipo I, que van de 3.200 a 3.400 msnm, son más vulnerables a las heladas anómalas. Esto ocurre porque están en una zona de transición donde las heladas fuera de temporada son más frecuentes, especialmente durante un fuerte evento de El Niño. Esta variabilidad dentro del Tipo I indica que no hay una única solución de adaptación. Los ganaderos de las altitudes más altas requieren principalmente mejorar la fertilidad del suelo para contrarrestar la sensibilidad microbiana al calor, mientras que aquellos en las cotas más bajas necesitan acumular forraje para el periodo de recuperación tras una helada.

El mapa de urgencia para la adaptación que surge de este análisis tiene tres niveles de prioridad. Primero, el 28% del Tipo I que ya está operando por debajo del punto de equilibrio necesita cambios en su producción o diversificación de ingresos, ya que las herramientas de adaptación climática no pueden hacer que lo inviable se vuelva viable. En segundo lugar, el 44% del Tipo I que opera por encima del punto de equilibrio en años normales, pero cae por debajo durante eventos de El Niño moderado, requiere medidas a corto plazo, como sistemas de alerta temprana, suplementos proteicos de emergencia y seguros climáticos indexados para disminuir la volatilidad de sus ingresos anuales. Por último, el 28% restante del Tipo I que sigue siendo viable incluso durante eventos de El Niño moderado necesita estrategias a largo plazo, como mejoras genéticas, pasturas mixtas y fertilización de mantenimiento, para garantizar y aumentar la productividad entre 2025 y 2050.

11.8 Síntesis del capítulo

- El análisis de escenarios (Tabla 51) presenta tres posibles futuros, cada uno con cinco dimensiones. El escenario SC asocia un RCP 4.5 sin adaptación, precios estables y un ligero aumento en costos. Por otro lado, el ST también se basa en RCP 4.5, pero se caracteriza por una mayor frecuencia de eventos extremos, con un 20–40% de adaptación moderada y un mejoramiento genético gradual de +0,4 L/vaca/año. Finalmente, el escenario SA, que se enmarca en un RCP 8.5, incluye sub-escenarios: SA-A, sin adaptación, y SA-B, con una adaptación integral que alcanza entre el 60 y el 85%. La tasa de descuento de referencia se sitúa en un 8%, empleándose la metodología VAN para comparar los flujos de ingresos netos de los ganaderos entre 2025 y 2050.
- En cuanto al impacto previsto para 2035 (Tabla 52), el Tipo I bajo SC muestra una producción de 6,6 L/vaca/día, lo que representa una disminución del 11%, y un margen neto de USD 410, un asombroso descenso del 89%, con el 68% de las fincas operando por debajo del punto de equilibrio. En el escenario ST, la producción se eleva a 7,7 L/vaca/día, lo que implica una ligera mejora del 4%, con un margen neto de USD 1.580, un 59% menos, y el 42% de las fincas todavía por debajo del equilibrio. En el caso del SA, con adaptación, se prevé que la producción alcance 8,4 L/vaca/día (+14%), con un margen de USD 3.300, que aunque representa una caída del 15%, solo el 32% de las fincas quedarían por debajo del equilibrio. La diferencia de margen neto entre SA y SC para 2035 es de +USD 2.890 por finca, lo que equivale al 75% del margen neto proyectado para 2024; además, el VAN(ST–SC) para 2035 sería de +USD 14.280 por finca.

- Mirando hacia 2050 y el punto de inflexión (Tabla 53), para el SC se anticipa un margen neto negativo de –USD 820, lo que señala la inviabilidad económica del Tipo I promedio alcanzada en 2041, con un margen de error de ± 4 años; el 76% de las fincas se verían afectadas. Para el SA-A, se estima un margen neto de –USD 3.640, alcanzando la inviabilidad en 2038 con una variabilidad de ± 3 años, alcanzando el 100% de inviabilidad. Por el contrario, el ST proyecta un margen neto positivo de +USD 4.840, un incremento del 25% respecto al margen base, con un 28% de fincas bajo el equilibrio, igual que el base. En el SA-B, el margen neto sería +USD 6.280, un impresionante 62% más que el margen base, con solo el 22% de las fincas por debajo del equilibrio. En cuanto a los VANs, el Tipo I en SC presenta una pérdida de –USD 58.400 por finca, el SA-A muestra –USD 124.800 por finca, mientras que el SA-B es el único con un VAN positivo de +USD 12.600 por finca.
- En términos de distribución e inequidad (Tabla 54), el índice de Gini del ingreso dentro del corredor aumenta de 0,62 (en base) a 0,68 bajo SC, pero disminuye a 0,58 bajo ST para el 2035. La relación de vulnerabilidad-participación del Tipo I es de 2,9 veces bajo SC, absorbiendo el 24% de las pérdidas con solo el 8,4% de la producción, mientras que baja a 1,4 veces bajo ST. En cuanto a la variabilidad del ingreso interanual del Tipo I, se observa un crecimiento del 38% en la base, aumentando al 52% en SC y reduciéndose al 28% en ST, lo cual indica que la adaptación disminuye la volatilidad del ingreso por debajo de la base. El índice de Persistencia Ganadera del Páramo es del 72% bajo SC, lo que indica que el 28% de los ganaderos abandonan la actividad para 2035, pero se eleva al 91% bajo ST. La asimetría de vulnerabilidad del Tipo I, que muestra un impacto relativo mayor que uno absoluto, respalda la necesidad de un seguro climático que compense proporcionalmente al margen neto en lugar de a la producción.
- En el análisis de sensibilidad (Tabla 55), el VAN de la adaptación es positivo a través de todos los parámetros evaluados. Con una tasa de descuento del 12%, se genera un VAN de +USD 31.800 por finca; si el precio de la leche se fija en USD 0,38/L, se obtiene +USD 28.400 por finca; al duplicar el costo de adaptación, se logra +USD 28.400 por finca; con una fuerte frecuencia de El Niño cada cinco años, el VAN asciende a +USD 58.600 por finca. Si la tasa de adopción es del 5%, el beneficio para el corredor sería de USD 28,4

millones; el umbral de inviabilidad de la adaptación se sitúa en un precio inferior a USD 0,29/L (un 31% menos que el actual) o un costo superior a USD 2.840 por finca al año (cinco veces el valor base). En resumen, la adaptación es económicamente viable en prácticamente cualquier escenario razonable.

- El hallazgo principal de este capítulo indica que una adaptación moderada puede generar un VAN neto de +USD 44.200 por finca para 2050 en el Tipo I bajo RCP 4.5, lo que proporciona un beneficio de +USD 44.200 en comparación con un costo de adaptación con un VAN de +USD 3.840. En contraparte, una adaptación integral ofrece un VAN positivo de +USD 12.600 por finca, incluso bajo el escenario más alto de emisiones, RCP 8.5. El punto de inflexión para la inviabilidad del Tipo I sin adaptación, que se espera entre 2038 y 2041, delimita una ventana de decisión de entre 12 y 17 años para implementar las políticas de los Caps. 12 y 13, siendo que esta ventana comenzará a cerrarse antes de 2030.

CAPÍTULO 12

Análisis Costo-Beneficio de las Estrategias de Adaptación

Inventario de seis intervenciones con costos unitarios, BCR privado de 5,8× y público de 19,4× del Paquete Básico, TIR del 42%, co-beneficios ecosistémicos de USD 10–20 M/año, y posición del corredor en el cuartil superior de rentabilidad de la adaptación ganadera andina



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Describir** el inventario de las seis intervenciones de adaptación evaluadas —IA-1 a IA-6— con sus costos unitarios, los supuestos técnicos de la estimación de costos, y las barreras principales de adopción para el Tipo I del corredor del Carchi.
- **Calcular** la relación beneficio-costos (BCR), la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión para cada intervención individual y para el Paquete Básico (BCR = 5,8; TIR = 42%; payback = 2,1 años) y el Paquete Integral (BCR = 5,2; TIR = 38%), incluyendo las sinergias entre intervenciones.
- **Interpretar** el ACB desde la perspectiva del sector público, incluyendo el BCR público del Paquete Básico de 19,4×, el costo total del programa de USD 164.000/año (1,05%

del presupuesto del MAG-Carchi), y la lógica del autofinanciamiento del programa con la sola reducción del gasto de emergencia reactivo.

- **Valorar cualitativamente** los co-beneficios no monetizados: reducción de emisiones de GEI (−1.840 t CO₂eq/año al 40% de adopción), conservación de 1.638 ha de páramo (USD 10,2–20,3 M/año en servicios ecosistémicos), seguridad alimentaria de 22.400 personas y retención de 468 personas en el páramo.
- **Comparar** el BCR del corredor del Carchi con cinco casos de ganadería de alta altitud en los Andes latinoamericanos y concluir que el corredor se ubica en el cuartil superior de rentabilidad de la adaptación.
- **Aplicar** la jerarquía de prioridad de las intervenciones y la secuencia óptima de implementación —Fase 1: IA-5 + IA-1 + IA-2; Fase 2: IA-3; Fase 3: IA-4 + IA-6— para diseñar una ruta de inversión que maximice el retorno de corto plazo mientras construye la capacidad adaptativa de largo plazo.

12.1 Introducción: El Costo de Adaptar vs. el Costo de No Adaptar

Los Capítulos 10 y 11 nos muestran el precio de no adaptarse: una EAL de 6,4 millones de dólares al año y una pérdida de 5.840 dólares por finca del Tipo I durante un fuerte fenómeno de El Niño, lo que equivale a un 150% del margen neto anual. Además, se prevé que, sin adaptación, el Tipo I alcance un punto crítico de inviabilidad económica entre 2038 y 2041.

El Capítulo 12 aborda una pregunta importante: ¿cuánto cuesta realmente adaptarse y qué beneficios trae esta inversión? La respuesta, que se presenta de manera analítica en la Parte IV, indica que adaptar tiene un costo de 820 dólares por finca al año para el Paquete Básico y de 1.320 dólares por finca al año para el Paquete Integral. Estos montos son pequeñas fracciones en comparación con los costos de no adaptarse. Además, los retornos que se generan superan los que cualquier inversión financiera convencional podría ofrecer: un BCR de 5,8 para el paquete privado y de 19,4 para el programa público.

Este capítulo utiliza el enfoque del Análisis Costo-Beneficio (ACB) desde dos ángulos: la perspectiva privada, que refleja el retorno para cada ganadero, y la perspectiva pública, que considera el retorno para la sociedad y el Estado que apoya parcialmente la adaptación. Esta distinción es fundamental, ya que los co-beneficios de la adaptación —como la reducción de gases de efecto invernadero, la conservación del páramo, la seguridad alimentaria y la retención

de población rural— son beneficios que, aunque no se incluyen en el BCR privado, justifican la inversión pública según el BCR público.

12.2 Inventario de Intervenciones y Costos Unitarios

12.2.1 Criterios de Selección: La Cadena Causal como Marco de Intervención

Las seis intervenciones que se han evaluado surgen directamente del SEM que se presenta en el Capítulo 9. Las intervenciones IA-1 e IA-2 se enfocan en el eslabón 3–4, que conecta los microbios del suelo con los nutrientes. Este es el eslabón que muestra el mayor coeficiente estructural, con valores de $\beta_{31} = 0,71$ y $\beta_{41} = 0,58$.

Luego, tenemos las intervenciones IA-3 e IA-4, que se ocupan del eslabón 5, donde el forraje se convierte en alimento para las vacas, con un coeficiente de $\beta_{51} = 0,68$. Por otro lado, la intervención IA-5 actúa como un multiplicador transversal, mejorando la eficiencia de todas las otras intervenciones. Cabe destacar que el rezago ONI→N_mineral del Capítulo 6 permite anticipar entre 45 y 60 días.

Finalmente, la intervención IA-6 se centra en el eslabón 6, que abarca la transformación de las vacas en leche, con un coeficiente de $\beta_{71} = 0,82$, el cual se mantiene constante entre los distintos tipos. Esto refuerza el impacto de las intervenciones que han sido aplicadas anteriormente.

Tabla 56.

Inventario de las Seis Intervenciones de Adaptación, Costos Unitarios, Costos a Escala del Corredor y Características Técnicas para el Tipo I del Corredor del Carchi

Intervención de Adaptación	Costo Unitario (USD/finca/año; Tipo I)	Costo total 620 fincas Tipo I	Fuente del costo, supuestos clave y disponibilidad tecnológica local
IA-1: Fertilización fosfatada correctiva (roca fosfórica o superfosfato triple; dosis correctiva para alcanzar umbral $P = 20$ mg/kg suelo; mantenimiento anual)	USD 380 $\pm$ 80/finca/año (año 1 correctivo: USD 680; mantenimiento años 2–10: USD 280; promedio anualizado al 8%: USD 380)	USD 235.600/año anualizado; pico inversión año 1: USD 421.600	Cotizaciones en almacenes agropecuarios de Tulcán y Bolívar (marzo 2024): roca fosfórica USD 0,42/kg; superfosfato triple USD 0,68/kg; dosis correctiva: 180–240 kg $P_{2O5}/ha \times 1,8$ ha pastizal efectivo Tipo I = 62–80 kg producto/ha. Tecnología disponible: roca fosfórica producida en Ecuador (Grupo Familia, Loja); aplicación con equipo manual accesible. Barrera principal: capital para la dosis correctiva inicial.
IA-2: Encalado correctivo (cal)	USD 180 $\pm$ 40/finca/año (año 1 correctivo: USD 280; promedio anualizado al 8%: USD 180)	USD 111.600/año	Cal agrícola dolomítica: USD 0,18/kg; dosis: 1,8–2,4 t/ha $\times 1,8$ ha = 3,2–4,3

Intervención de Adaptación	Costo Unitario (USD/finca/año; Tipo I)	Costo total 620 fincas Tipo I	Fuente del costo, supuestos clave y disponibilidad tecnológica local
agrícola dolomítica para corregir pH < 5,5 y neutralizar aluminio tóxico; correctivo año 1 + mantenimiento cada 3 años)	1: USD 420; mantenimiento cada 3 años: USD 180; promedio anualizado a 10 años: USD 180)	inversión año 1: USD 260.400	t/finca. Proveedor regional: calizas del Carchi (cantón Montúfar). Efecto esperado: aumento del pH de 5,1 a 5,8–6,2 (Cap. 5); reducción de Al tóxico del 42% al < 10% de las fincas. Barrera: desconocimiento del efecto; solo el 14% del Tipo I ha encalado alguna vez.
IA-3: Pasturas mixtas adaptadas al páramo (Lolium perenne cv. Endura + Poa pratensis cv. Kenblue + Trifolium repens cv. Huia; proporción 60/20/20; renovación gradual 0,6 ha/finca/año)	USD 240 ± 60/finca/año (semilla: USD 184/ha × 0,6 ha = USD 110; preparación del suelo: USD 130/ha × 0,6 ha = USD 78; otros: USD 52)	USD 148.800/año; ciclo completo 3 años: USD 446.400 total	Semillas disponibles en casas comerciales de Tulcán (Ecuaquímica, Agripac). La mezcla aumenta la digestibilidad en 5–8 pp y el contenido proteico en 2,4–3,8 pp respecto al kikuyo puro (Cap. 7). Barrera: el 88% del Tipo I nunca ha renovado el pastizal. Solución propuesta: banco comunitario de semillas (Cap. 13).
IA-4: Reservas de forraje diferido (silo de maíz forrajero; capacidad para cubrir 40% de la demanda forrajera durante 60 días de evento extremo; 12 t MS/finca)	USD 320 ± 80/finca/año (producción y almacenamiento del silo: 12 t MS × USD 26,7/t = USD 320; infraestructura silopack 12 t capacidad: USD 480 inversión inicial amortizada)	USD 198.400/año; con subsidio del 50%: USD 99.200 costo público	Solo el 6% del Tipo I tiene reservas de forraje sistemáticas. El silopack (USD 480 de inversión, vida útil 5 años, costo anualizado USD 96/año) es la barrera de capital principal. La IA-4 mitiga el 38% del impacto del El Niño fuerte manteniendo la condición corporal de las vacas durante el episodio (Cap. 8, Tabla 8.4).
IA-5: Sistema de monitoreo de suelos y alerta temprana ENSO–ONI (análisis de suelo 1 vez/año + suscripción al sistema de alertas climáticas UPEC + acceso al protocolo de contingencia diferenciado)	USD 68 ± 12/finca/año (análisis de suelo LABONORT Tulcán: USD 42; muestreo y envío: USD 8; suscripción sistema de alertas: USD 18/año)	USD 42.160/año; el sistema de alertas tiene economías de escala: costo fijo de operación USD 18.000/año diluido entre las 620 fincas suscritas = USD 29/finca/año	El LABONORT tiene capacidad instalada de 2.400 análisis/año. El sistema de alertas ENSO–ONI fue desarrollado como parte del proyecto UPEC–INIAP y está operativo desde enero 2024: genera alertas automáticas cuando el ONI supera 0,5°C de anomalía, con protocolo diferenciado para El Niño y La Niña. Barrera: la menor entre todas las intervenciones; el principal obstáculo es la cultura de análisis de suelos, no el costo.
IA-6: Inseminación artificial con	USD 180 ± 40/finca/año (2,8	USD 111.600/año;	Germoplasma de toros evaluados a 3.200–3.800 msnm con prueba de

Intervención de Adaptación	Costo Unitario (USD/finca/año; Tipo I)	Costo total 620 fincas Tipo I	Fuente del costo, supuestos clave y disponibilidad tecnológica local
germoplasma de razas adaptadas al páramo (Jersey × Normando × criollo andino; banco de germoplasma INIAP-UPEC; 60% de tasa de inseminación exitosa)	inseminaciones/año × USD 38/dosis seminal + manejo reproductivo USD 54/finca/año; 1,7 preñeces/año con genética mejorada = 0,57 vacas recambio/año)	banco germoplasma INIAP: capacidad 8.000 dosis/año de toros probados en páramo	progenie 48 meses. Jersey y Normando: mejor tolerancia al frío y mejor eficiencia de conversión de forraje de baja calidad que el Holstein. Potencial: +0,8 L/vaca/día generación 1 (+10,8%); +1,6 L/vaca/día generación 2 (+21,6%). Barrera más alta: resistencia cultural al cambio de raza + espera de 3–4 años para ver resultados.
PAQUETE BÁSICO (IA-1 + IA-2 + IA-3 + IA-5): costo combinado con economías de escala en la implementación conjunta	USD 820 ± 140/finca/año (suma de los componentes; la implementación conjunta reduce el costo en ~8% por economías de planificación y visitas técnicas compartidas)	USD 508.400/año para el total del Tipo I = 3,3% del presupuesto del MAG-Carchi (USD 15,6 M/año)	El Paquete Básico concentra las intervenciones con mayor BCR (IA-5: 8,4; IA-1: 6,2; IA-2: 4,8; IA-3: 3,6) y las de menor barrera de adopción. El costo del Paquete Básico para todo el Tipo I (USD 508.400/año) es financieramente realista como intervención de política provincial.
PAQUETE INTEGRAL (IA-1 + IA-2 + IA-3 + IA-4 + IA-5 + IA-6): todas las intervenciones	USD 1.320 ± 220/finca/año	USD 818.400/año = 5,2% del presupuesto del MAG-Carchi	El Paquete Integral añade las reservas de forraje (IA-4) y el mejoramiento genético (IA-6) al Paquete Básico. Su costo mayor produce los mayores beneficios a largo plazo (escenario SA-B del Cap. 11: margen neto +62% al 2050). La barrera financiera justifica el subsidio diferenciado del Cap. 13: 40% para IA-4 e IA-6 y 20–30% para IA-1, IA-2 e IA-3.

Nota. Elaboración propia.

12.3 BCR, TIR y Período de Recuperación: El Retorno Privado de la Adaptación

Tabla 57.

Relación Beneficio-Costo, Tasa Interna de Retorno y Período de Recuperación de las Seis Intervenciones y los Dos Paquetes para el Tipo I del Corredor del Carchi (horizonte: 10 años; tasa de descuento: 8%)

Intervención / Paquete	BCR (10 años; privado)	TIR (%)	Payback (años)	Cálculo de beneficios, comparación internacional y jerarquía de prioridad
IA-1: Fertilización	BCR = 6,2	TIR = 48%	1,8 años	Beneficios a 10 años por finca: (1) aumento PPNA +824 kg MS/ha/año × 1,8 ha ×

Intervención / Paquete	BCR (10 años; privado)	TIR (%)	Payback (años)	Cálculo de beneficios, comparación internacional y jerarquía de prioridad
fosfatada correctiva				equivalencia forrajera USD 0,42/L × 10 años = USD 6.220; (2) reducción pérdidas El Niño: USD 5.840 × 35% reducción × probabilidad episodio = USD 720; (3) mejora calidad forraje +2,4 pp PC → +0,8 L/vaca/día × 365 × USD 0,42 × 8,4 vacas × 10 años = USD 1.030; total beneficios: USD 7.970; costo VAN 10 años al 8%: USD 1.288; BCR = 6,2. Comparación: BCR de fertilización fosfatada en páramo colombiano: 4,8–7,2 (Tapasco et al., 2015). Jerarquía: MÁXIMA PRIORIDAD.
IA-2: Encalado correctivo	BCR = 4,8	TIR = 38%	2,4 años	Beneficios a 10 años: (1) neutralización Al tóxico → recuperación disponibilidad P, K, Mg (encalado potencia IA-1 en 30%): USD 1.840; (2) mejora actividad microbiana (urease +28% post-encalado) → mineralización N +12% → PPNA +6%: USD 1.680; (3) reducción costo fertilización química (pH > 5,8 requiere 20% menos fertilizante): USD 420; total USD 3.940; costo VAN: USD 818; BCR = 4,8. Sinergia IA-1 + IA-2: BCR sinérgico = 8,4 (el pH óptimo potencia la eficiencia del fósforo aplicado). Jerarquía: MÁXIMA PRIORIDAD.
IA-3: Pasturas mixtas adaptadas	BCR = 3,6	TIR = 28%	3,2 años	Beneficios a 10 años: (1) aumento digestibilidad +6,4 pp → +1,2 L/vaca/día × 365 × USD 0,42 × 8,4 vacas × 10 años = USD 1.548; (2) aumento proteína cruda +3,1 pp → reducción pérdidas La Niña del 35%: USD 2.840 × 35% × probabilidad = USD 512; (3) fijación simbiótica N por Trifolium repens → ahorro fertilización nitrogenada USD 180/finca/año × 10 = USD 1.800; total USD 3.860; costo VAN: USD 1.072; BCR = 3,6. Jerarquía: ALTA PRIORIDAD (después de IA-1 e IA-2 por mayor payback).
IA-4: Reservas de forraje diferido	BCR = 2,8	TIR = 22%	4,6 años	Beneficios: reducción impacto El Niño fuerte en 38% (de -51% a -32% producción) = USD 5.840 × 38% × probabilidad El Niño fuerte + USD 2.620 × 38% × probabilidad El Niño moderado = USD 2.880; reducción descarte forzoso: USD 480; total USD 3.360; costo VAN USD 1.200; BCR = 2,8. El menor BCR individual de IA-4 refleja el mayor costo de

Intervención / Paquete	BCR (10 años; privado)	TIR (%)	Payback (años)	Cálculo de beneficios, comparación internacional y jerarquía de prioridad
				capital (infraestructura silopack). Sin embargo, IA-4 tiene el mayor beneficio de reducción de riesgo durante El Niño, justificando el subsidio a la infraestructura. Jerarquía: ALTA PRIORIDAD ante El Niño; MEDIA como inversión aislada.
IA-5: Sistema de monitoreo y alerta temprana	BCR = 8,4	TIR = 84%	0,9 años	Beneficios a 10 años: el sistema activa el protocolo de contingencia con 45–60 días de anticipación (rezago ONI→N_mineral del Cap. 6), permitiendo: (1) compra anticipada de suplementos a precio normal (ahorro vs. compra de emergencia): USD 360; (2) decisión temprana retención/venta del ganado (evita descarte en el peor momento del precio): USD 420; (3) aplicación anticipada IA-1 antes del deterioro del suelo (+18% de eficiencia): USD 420; total USD 1.200 (costo VAN: USD 143); BCR = 8,4. BCR más alto por ser la de menor costo y mayor efecto multiplicador. Jerarquía: MÁXIMA PRIORIDAD — debe implementarse antes o simultáneamente con todas las demás.
IA-6: Inseminación artificial con germoplasma mejorado	BCR = 4,2	TIR = 34%	3,8 años	Beneficios a 10 años: (1) aumento potencial genético: +0,8 L/vaca/día generación 1 (años 4–7) × USD 0,42 × 365 × 8,4 vacas × 4 años = USD 4.128; +1,6 L/vaca/día generación 2 (años 8–10) × USD 0,42 × 365 × 8,4 vacas × 3 años = USD 6.192; (2) mayor tolerancia climática: reducción impacto El Niño moderado en 18%: USD 420; total VAN: USD 5.040; costo VAN USD 1.196; BCR = 4,2. El payback de 3,8 años refleja el tiempo biológico inevitable para ver resultados del mejoramiento genético. Jerarquía: ALTA PRIORIDAD a largo plazo (2030–2050); MENOR URGENCIA para eventos climáticos de corto plazo.
PAQUETE BÁSICO (IA-1+IA-2+IA-3+IA-5)	BCR = 5,8 (sinérgico; > promedio individual)	TIR = 42%	2,1 años	BCR sinérgico calculado como cociente entre beneficios combinados (incluyendo sinergias: IA-5 potencia la eficiencia de IA-1 en 18%, de IA-3 en 14% y de IA-4 en 22%) y costo combinado. Beneficios totales Paquete Básico a 10 años por finca: USD 21.280; costo VAN: USD 3.660; BCR = 5,8. Coherencia perfecta con el Cap. 11: VAN(ST–SC)/VAN(costo ST) =

Intervención / Paquete	BCR (10 años; privado)	TIR (%)	Payback (años)	Cálculo de beneficios, comparación internacional y jerarquía de prioridad
				USD 44.200 / USD 7.620 = 5,8; el análisis de escenarios y el ACB son mutuamente consistentes.
PAQUETE INTEGRAL (IA-1 a IA-6)	BCR = 5,2	TIR = 38%	2,6 años	BCR del Paquete Integral (5,2) menor que el Básico (5,8) porque IA-4 (BCR = 2,8) y el largo payback de IA-6 reducen el BCR promedio. Sin embargo el Paquete Integral produce el mayor beneficio absoluto por finca a 10 años (USD 34.680) y es el más próximo al escenario SA-B del Cap. 11 (VAN +USD 12.600/finca al 2050 bajo RCP 8.5). Recomendación de implementación: Paquete Básico primero (priorizando IA-5 e IA-1), añadir IA-4 e IA-6 a partir del año 3 cuando los beneficios del Básico financian parcialmente la inversión adicional.

Nota. Elaboración propia.

12.3.1 La Secuencia Óptima de Implementación

La Tabla 12.2 presenta una jerarquía clara de prioridades para los ganaderos del Tipo I que enfrentan restricciones de capital. La secuencia óptima a seguir es la siguiente: Fase 1 (año 1, desembolso de USD 1.168 por finca): se comienza con el IA-5 (sistema de alerta, USD 68), seguido del IA-1 correctivo (USD 680) y, por último, el IA-2 correctivo (USD 420). Es crucial activar primero el sistema de alerta temprana, ya que este identifica el momento ideal para aplicar encalado y fertilización. Esto es especialmente efectivo cuando la humedad del suelo se encuentra entre el 40% y el 80% de su capacidad de campo, tal como lo determina el sistema.

Los beneficios comienzan a notarse desde el primer año de pastoreo posterior a la aplicación, lo que ocurre al menos 60 días después del encalado. En la Fase 2 (años 2 a 3, USD 280 por finca cada año), se mantiene el IA-1 y el IA-2, y se inicia la renovación gradual del pastizal con el IA-3 (0,6 ha por año). Los beneficios generados por el IA-1 y el IA-2 comienzan a cubrir parcialmente los costos del IA-3 a partir del segundo año.

Finalmente, en la Fase 3 (a partir del año 3, USD 500 adicionales por finca al año), se implementan el IA-4 (reservas de forraje) y el IA-6 (inseminación artificial). En este punto, los

beneficios acumulados de las Fases 1 y 2 generan un flujo de caja suficiente para costear estas inversiones que requieren un mayor capital inicial.

"Con lo que me dice el análisis de suelos, sé exactamente dónde meter el dinero primero. Ya no estoy tirando plata a la finca sin saber si va a funcionar."
(Testimonio de ganadero del Tipo I, cantón Espejo, seguimiento a 12 meses post-implementación de IA-1 e IA-5, proyecto UPEC 2024).

12.4 El ACB desde la Perspectiva del Sector Público: BCR de 19,4×

Tabla 58.

Análisis Costo-Beneficio desde la Perspectiva del Sector Público: Costos del Programa Subsidiado y Beneficios Públicos Directos e Indirectos del Paquete Básico para el Tipo I del Corredor del Carchi

Componente del ACB Público	Costo para el Sector Público (USD/año; subsidio diferenciado)	Beneficio Público (USD/año)	Interpretación de la Relación Costo-Beneficio Público y fuentes de financiamiento
Subsidio IA-1 (fertilización fosfatada): 30% del costo unitario × 620 fincas Tipo I, escalado a 5 años	USD 43.680/año (USD 380 × 30% × 620 × 0,62 cobertura promedio durante 2025–2030; cobertura completa desde 2030: USD 70.680/año)	Reducción EAL atribuible a IA-1: USD 6,4 M × 35% reducción de pérdidas × 33% peso de IA-1 en la reducción total = USD 746.400/año esperado; + reducción del gasto de asistencia técnica de emergencia del MAG-Carchi durante El Niño: USD 42.000/año	BCR público IA-1: USD 788.400 / USD 43.680 = 18,1×. Fuente de financiamiento: Fondo de Adaptación del MAGAP (presupuesto disponible: USD 2,4 M/año para la sierra ecuatoriana); alineado con el Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible 2023–2030.
Subsidio IA-2 (encalado correctivo): 30% del costo × 620 fincas Tipo I	USD 22.320/año (USD 180 × 30% × 620)	Reducción del gasto de asistencia de emergencia del MAG-Carchi durante El Niño (que históricamente suma USD 280.000–420.000/episodio; el encalado + fertilización fosfatada conjuntos reducen esa demanda en el 24%): USD 84.000/año esperado; co-beneficio ambiental del encalado: reducción de emisiones N2O en 12–18% → valor	BCR público IA-2: USD 84.000 / USD 22.320 = 3,76×. El co-beneficio climático del encalado (reducción de N2O) no se incluye en el BCR principal pero refuerza el argumento de inversión.

Componente del ACB Público	Costo para el Sector Público (USD/año; subsidio diferenciado)	Beneficio Público (USD/año)	Interpretación de la Relación Costo-Beneficio Público y fuentes de financiamiento
		en mercado voluntario de carbono REDD+ Ecuador (USD 3,2/t CO ₂ eq): USD 5.900–8.800/año	
Operación del sistema de monitoreo y alerta temprana IA-5: costo fijo del sistema + subsidio a análisis de suelo para el 60% de las fincas Tipo I de menor capacidad de pago	USD 36.400/año (costo fijo operación del sistema: USD 18.000/año + análisis de suelo subsidiados para 372 fincas × USD 50/análisis = USD 18.600/año)	Beneficio público 1 — información para la planificación del MAG-Carchi: el sistema genera datos de monitoreo continuo de 80 UPAs centinela que mejoran la calidad de las decisiones de política agropecuaria; valor equivalente de un programa de monitoreo convencional: USD 120.000/año. Beneficio público 2 — reducción de la demanda de asistencia reactiva durante El Niño: USD 42.000/año	BCR público IA-5: (USD 120.000 + USD 42.000) / USD 36.400 = 4,45×. El sistema de alerta temprana tiene el perfil de bien público puro (no rival, no excluyente), justificando financiamiento público completo del costo operativo sin subsidio parcial.
Subsidio IA-4 (reservas de forraje / infraestructura de silos): 40% del costo × 620 fincas × 50% adopción objetivo al 2030	USD 39.680/año (USD 320 × 40% × 620 × 0,50 adopción)	Reducción de la demanda de suplementación de emergencia subsidiada durante El Niño fuerte (el MAG-Carchi históricamente provee balanceado subsidiado durante El Niño; costo del programa emergencia 2015–2016: USD 280.000; el silo previo reduce la demanda en 60%): USD 84.000/año esperado	BCR público IA-4: USD 84.000 / USD 39.680 = 2,12×. El BCR público es mayor que el privado porque el sector público captura el beneficio de la reducción del programa de suplementación de emergencia. Fuente: Fondo de Contingencia Climática del Ministerio de Agricultura (presupuesto 2024: USD 4,8 M/año para toda la sierra).
Programa de inseminación artificial subsidiada (IA-6): 40% del costo de la dosis seminal + capacitación técnica en manejo reproductivo	USD 44.640/año (USD 180 × 40% × 620 = USD 44.640; incluye la capacitación técnica de un técnico de manejo reproductivo)	Aumento del valor de la producción láctea provincial: +0,8 L/vaca/día en primera generación × 5.208 vacas del Tipo I = +4.166 L/día × USD 0,42/L × 365 días = +USD 639.000/año desde el año 4 del programa	BCR público IA-6: USD 639.000 (desde año 4) / USD 44.640 = 14,3× desde el año 4; VAN total a 10 años: BCR = 4,8×. El delay de 3–4 años para ver resultados hace que sea el de más difícil justificación política de corto plazo. Recomendación: comunicarlo como inversión en la competitividad láctea del Carchi a largo plazo.

Componente del ACB Público	Costo para el Sector Público (USD/año; subsidio diferenciado)	Beneficio Público (USD/año)	Interpretación de la Relación Costo-Beneficio Público y fuentes de financiamiento
para 620 ganaderos del Tipo I	por cantón: USD 8.400/año para 4 cantones del corredor)		
COSTO PÚBLICO TOTAL DEL PAQUETE BÁSICO SUBSIDIADO (IA-1 + IA-2 + IA-5 + subsidio parcial IA-3 + extensionistas): implementación para 620 fincas del Tipo I al 100% de cobertura	USD 164.000/año (IA-1: USD 43.680 + IA-2: USD 22.320 + IA-3 subsidio 20%: USD 30.000 + IA-5 operación completa: USD 36.400 + 4 extensionistas especializados en páramo: USD 31.600/año)	Beneficio público total del Paquete Básico: (1) reducción EAL: -USD 2.880.000/año (de USD 6,4 M a USD 3,52 M/año); (2) reducción asistencia reactiva: -USD 185.000/año; (3) valor información del sistema de monitoreo: +USD 120.000/año; total: USD 3.185.000/año	BCR público del Paquete Básico: USD 3.185.000 / USD 164.000 = 19,4×. El costo total del Paquete Básico (USD 164.000/año) representa el 1,05% del presupuesto del MAG-Carchi (USD 15,6 M/año). El programa prácticamente se autofinancia con la sola reducción del gasto de emergencia reactivo (USD 185.000 vs. USD 164.000 costo total).

Nota. Elaboración propia.

12.4.1 El Autofinanciamiento del Programa y el Argumento de Eficiencia Pública

El BCR público de 19,4× del Paquete Básico resalta la eficiencia de la inversión pública: por cada peso que el MAG-Carchi destina al programa de adaptación, la sociedad ecuatoriana recupera USD 19,4. Esto se traduce en menos pérdidas para el sector ganadero, una disminución en el gasto de emergencias y el valor que aporta la información de monitoreo.

Un hallazgo notable de la Tabla 12.3 es que el programa prácticamente se financia por sí mismo solo con la reducción del gasto de emergencia reactivo. El MAG-Carchi ya invierte entre USD 280.000 y USD 420.000 cada vez que ocurre un episodio fuerte de El Niño en asistencia técnica y subsidios de emergencia. Con un costo público anual de USD 164.000 para el Paquete Básico, se podría bajar esa necesidad en USD 185.000 al año, lo que supera el costo total del programa. Además, esto generaría una reducción de la EAL de USD 2,88 M anuales como beneficio neto.

12.5 Co-beneficios No Monetizados: El Valor Completo de la Adaptación

Tabla 59.

Co-beneficios Ambientales y Sociales No Monetizados del Paquete de Adaptación para el Tipo I del Corredor del Carchi al 2035 (con adopción del 40% de las 620 fincas)

Co-beneficio Ambiental o Social	Magnitud Estimada (al 2035 con 40% de adopción en el Tipo I)	Relevancia para la justificación integral de la inversión
Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (metano entérico y N₂O del suelo)	-1.840 t CO ₂ eq/año para las 248 fincas con adopción (40% × 620) × -7,4 t CO ₂ eq/finca/año; proviene principalmente de IA-2 (encalado reduce N ₂ O), IA-3 (pasturas mixtas con menor factor de emisión que el kikuyo monocultivo) y IA-6 (mejoramiento genético reduce emisiones por litro producido)	Valor en el mercado voluntario de carbono REDD+ Ecuador: USD 3,2–4,8/t CO ₂ eq × 1.840 t = USD 5.888–8.832/año. Flujo adicional de ingresos para el ganadero del Tipo I si se articula con el mercado de bonos de carbono. El INIAP está desarrollando un protocolo de medición de huella de carbono para la ganadería de páramo del Carchi que podría habilitarlos para el mercado de carbono en 2026–2027.
Conservación de los servicios ecosistémicos del páramo (regulación hídrica, captura de carbono, biodiversidad)	La reducción del abandono del páramo bajo ST vs. SC al 2035 (del 28% al 9% de ganaderos del Tipo I) conserva ~117 fincas × 14 ha/finca = 1.638 ha de páramo ganadero activo frente al abandono o conversión	Valor de los servicios ecosistémicos del páramo andino: USD 6.200–12.400/ha/año (De Groot et al., 2012; Balvanera et al., 2012) → conservación de 1.638 ha = USD 10,2–20,3 M/año. Este valor es 62–124 veces el costo del programa (USD 164.000/año). Los sistemas de abastecimiento de agua de Tulcán, Ibarra y Quito dependen parcialmente de las cuencas del páramo del Carchi; este valor justifica involucrar a la SENAGUA y los GAD en el financiamiento de la adaptación ganadera.
Seguridad alimentaria y soberanía alimentaria de la provincia del Carchi y el norte del Ecuador	14,03 M L/años producidos por el Tipo I del corredor (22.630 L/finca/año × 620 fincas = 8,5% de la producción provincial). La pérdida del 28% del Tipo I bajo SC representa 3,93 M L/años eliminados = consumo anual de 22.400 personas a	El impacto sobre la seguridad alimentaria no es solo cuantitativo: la leche del Tipo I abastece mercados locales rurales de bajo costo que el Tipo IV no sustituye (vende a centros de acopio de largo alcance). La pérdida del Tipo I genera déficit de abastecimiento local. La seguridad alimentaria del páramo es invisible en el ACB convencional pero central en el marco de soberanía alimentaria de la política agropecuaria del Ecuador.

Co-beneficio Ambiental o Social	Magnitud Estimada (al 2035 con 40% de adopción en el Tipo I)	Relevancia para la justificación integral de la inversión
	480 mL/día recomendado	
Reducción de la migración rural y conservación del tejido social del páramo	117 familias ganaderas adicionales que permanecen en el páramo al 2035 bajo ST vs. SC → ~468 personas retenidas (promedio 4 personas/familia, INEC 2022), de las cuales ~197 son menores de 18 años (42% menores; proyección SENPLADES 2024)	La retención de 468 personas en el páramo tiene valor para la sostenibilidad de los servicios educativos y de salud rurales. Las escuelas unidocentes del páramo del Carchi requieren un mínimo de 12–15 alumnos para mantenerse operativas; la pérdida de 117 familias bajo SC desencadenaría el cierre de 4–6 escuelas rurales del páramo al 2035, con consecuencias en cascada para la cohesión social de las comunidades restantes.

Nota. Elaboración propia.

12.5.1 El Páramo como Activo de Servicios Ecosistémicos y el PSE como Cofinanciamiento

La conservación de 1.638 hectáreas de páramo ganadero activo genera co-beneficios en servicios ecosistémicos que oscilan entre USD 10,2 y 20,3 millones al año. Este monto es entre 62 y 124 veces superior al costo del Paquete Básico, que es de USD 164.000 anuales. Esta gran diferencia indica que el cálculo del BCR tradicional realmente subestima el valor de la adaptación ganadera en el páramo.

Además, el beneficio de evitar el abandono del páramo tiene un impacto mucho más significativo que el beneficio inmediato que reciben los ganaderos en términos de ingresos. Este co-beneficio no es solo una cifra abstracta; los sistemas de abastecimiento de agua en ciudades como Tulcán, Ibarra y Quito dependen en parte de las cuencas del páramo del Carchi.

Cada hectárea de páramo ganadero activo que se conserva contribuye a regular el agua para las comunidades que están río abajo. Este valor resalta la necesidad de involucrar a la SENAGUA, al Ministerio del Ambiente y a los GAD en el financiamiento de la adaptación ganadera del páramo.

El mecanismo de Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) se presenta como una opción adicional para financiar la adaptación del Tipo I.

A través de este sistema, los beneficios de conservación del páramo pueden convertirse en una fuente de recursos complementarios, gestionados por el MAATE.

Se propone el Pago por Servicios Ecosistémicos como una alternativa complementaria para financiar la adaptación en los sistemas ganaderos Tipo I, así como para promover prácticas adaptadas a la conservación del páramo. Los productores que cumplan criterios de manejo sostenible validables podrían recibir una compensación como recompensa por la provisión de servicios como la regulación hídrica o conservación del suelo.

En Ecuador, el programa Socio Bosque podría ampliarse al corredor ganadero en Carchi, implementando la modalidad Socio Páramo. Esto permitiría compensar a los ganaderos del Tipo I que mantengan su carga animal por debajo del umbral de degradación, es decir, menos de 1,2 UBAs por hectárea en el área ganadera del páramo.

Según estimaciones, la tarifa del PSE para el páramo ganadero en Carchi, calculada utilizando el valor de los servicios hídricos de la cuenca del río Mira para Tulcán e Ibarra (SENAGUA, 2021), oscila entre 28 y 42 dólares por hectárea al año. Si consideramos que cada finca Tipo I tiene unas 14 hectáreas, el ingreso anual que podría percibir un ganadero que califique sería de entre 392 y 588 dólares, lo que representa entre el 47% y el 71% del costo del Paquete Básico de Adaptación.

Con el PSE actuando como co-financiamiento, el costo neto del paquete para el ganadero se reduce drásticamente, pasando de 820 dólares a un rango de 232 a 428 dólares por finca al año, disminuyendo así significativamente la barrera financiera para su adopción.

El capítulo 13 se centra en el diseño institucional de este mecanismo, buscando alinear los incentivos tanto para los ganaderos (recibiendo compensación por servicios ecosistémicos), como para el gobierno (que busca conservar el páramo de manera más económica que a través de un manejo estatal directo) y los usuarios del agua en las partes bajas (asegurando la regulación hídrica de sus sistemas de abastecimiento).

12.6 Comparación Internacional: El Carchi en el Cuartil Superior

Tabla 60.

Comparación del BCR del Paquete de Adaptación del Corredor del Carchi con Cinco Casos de Ganadería de Alta Altitud en los Andes Latinoamericanos

Caso de Comparación Internacional	BCR Privado del Paquete	BCR Público del Paquete	Costo (USD/finca/año)	Similitudes y diferencias con el corredor del Carchi
Ganadería de leche de páramo — Nariño, Colombia (Tapasco et al., 2015; 2.800–3.400 msnm; similar al Tipo I del Carchi)	4,2–5,8	8,4–14,2	USD 680–920	Similitudes: misma zona climática (norte de los Andes), exposición al ENSO comparable, sistemas extensivos con Kikuyo dominante, sensibilidad al P y al encalado similar. Diferencias: Nariño tiene mejor acceso al crédito formal (12 vs. 8,4% del Tipo I del Carchi) y menor pendiente promedio (menor costo de aplicación). El BCR del Carchi (5,8 privado; 19,4 público) es consistente con el rango superior del Nariño, reflejando el mayor nivel de degradación edáfica del páramo del Carchi que hace más rentable la intervención correctiva.
Ganadería de leche del altiplano — Cajamarca, Perú (Kristjanson et al., 2012; 3.000–3.800 msnm)	3,4–4,8	6,8–11,4	USD 580–820	Similitudes: sistemas extensivos de alta altitud, fertilidad del suelo baja, impacto del ENSO significativo. Diferencias: Cajamarca tiene mayor componente de ganado de doble propósito (leche + carne) que reduce el impacto de la variabilidad lechera sobre el ingreso total. El BCR del Carchi es mayor porque la especialización en leche hace que la adaptación tenga mayor impacto sobre el ingreso total.
Ganadería de leche del altiplano — Oruro y Potosí,	2,8–3,6	5,4–8,8	USD 420–620	Similitudes: alta altitud, suelos volcánicos, impacto severo del ENSO.

Caso de Comparación Internacional	BCR Privado del Paquete	BCR Público del Paquete	Costo (USD/finca/año)	Similitudes y diferencias con el corredor del Carchi
Bolivia (SENASAG, 2018; 3.600–4.200 msnm)				Diferencias: Bolivia tiene menor precio al productor (USD 0,28–0,34/L vs. USD 0,42/L del Carchi) que reduce el beneficio absoluto de la adaptación. El Carchi tiene la mejor relación precio/costo de los tres casos, explicando su mayor BCR.
Ganadería de leche de páramo — Boyacá, Colombia (Pradere et al., 2013; 2.600–3.200 msnm)	5,2–7,4	11,2–18,6	USD 720–960	Similitudes: zona andina similar, degradación del suelo avanzada, impacto del ENSO documentado. Diferencias: Boyacá tiene mayor escala (12 vs. 8,4 vacas/finca en el Tipo I del Carchi) y precios al productor más altos en años recientes (hasta USD 0,52/L en 2023 con cooperativas de Boyacá). El BCR superior de Boyacá refleja la mayor escala; el Carchi se ubica en el cuartil superior del grupo.
Ganadería de leche de altura — Andes centrales del Ecuador: Pichincha, Cotopaxi (INIAP, 2022; 2.800–3.400 msnm)	4,4–6,2	9,2–16,8	USD 640–880	Similitudes: condiciones climáticas y edáficas comparables, misma política agraria, acceso a los mismos insumos. Diferencias: sierra central con mayor acceso a mercados y menor exposición al ENSO. El BCR del Carchi es comparable al cuartil superior de la sierra central, indicando que las condiciones del corredor son propicias para la adaptación a pesar de la mayor exposición climática.

Nota. Elaboración propia.

12.7 El Caso de Inversión, en Síntesis

El caso de inversión en la adaptación climática de la ganadería del páramo del Carchi — síntesis del Capítulo 12

El **costo de adaptación** se sitúa en USD 820 por finca al año para el Paquete Básico, o USD 1.320 para el Paquete Integral en el Tipo I del corredor. Por otro lado, si no se lleva a cabo la adaptación, el costo asciende a USD 5.840 por finca durante un episodio fuerte de El Niño, lo que representa el 150% del margen neto anual. A largo plazo, se estima un costo total de USD 58.400 en valor actual neto para el año 2050 sin adaptación bajo el escenario RCP 4.5. Además, se proyecta que el Tipo I podría volverse económicamente inviable alrededor de 2041, con un margen de error de ± 4 años.

En términos de **retorno privado**, el beneficio-costo ratio (BCR) del Paquete Básico es de 5,8, con una tasa interna de retorno (TIR) del 42% y un período de recuperación de 2,1 años. Si analizamos el BCR por intervención, los resultados son los siguientes: IA-5 (8,4) es superior a IA-1 (6,2), seguido por IA-2 (4,8), IA-6 (4,2), IA-3 (3,6) y finalmente IA-4 (2,8).

En cuanto al **retorno público**, el BCR es de 19,4 veces, mientras que el costo del programa es de USD 164.000 al año, lo que equivale al 1,05% del presupuesto del MAG-Carchi. Es importante mencionar que el programa se auto-financia gracias a la reducción de gastos de emergencias reactivas.

Adicionalmente, los **co-beneficios no monetizados** son significativos: se prevé una reducción de 1.840 toneladas de CO₂ equivalente por año; la conservación de 1.638 hectáreas de páramo, que se traduce en un valor entre USD 10,2 y 20,3 millones al año, multiplicando entre 62 y 124 veces el costo del programa; la retención de 468 personas; y la prevención de cierres de entre 4 y 6 escuelas rurales. Además, se estima un potencial de pago por servicios ecosistémicos (PSE) de USD 392 a 588 por finca al año, como parte de un co-financiamiento.

Finalmente, **Posición comparativa**: cuartil superior de rentabilidad entre seis casos de ganadería de alta altitud en los Andes latinoamericanos.

12.8 Síntesis del capítulo

- Inventario de intervenciones (Tabla 56) IA-1 fertilización fosfatada, con un costo de USD 380 por finca al año, y una barrera de inversión inicial de USD 680, además de contar con tecnología disponible en la localidad. IA-2 encalado correctivo, a USD 180 por finca anualmente, enfrenta la cultura de encalado como barrera, ya que el 14% del Tipo I ha realizado encalado en alguna ocasión. IA-3 pasturas mixtas, que cuestan USD 240 al año por finca, tiene como desafío que el 88% del Tipo I nunca ha renovado su pastizal. IA-4 reservas de forraje, con un costo de USD 320 por finca al año, presenta la barrera de una infraestructura silopack que requiere una inversión inicial de USD 480. IA-5 alerta temprana, a USD 68 por finca anualmente, tiene una barrera menor, ya que el sistema UPEC comenzará a operar desde enero de 2024. Por último, IA-6 inseminación artificial, a USD 180 por finca al año, enfrenta la mayor barrera: la resistencia cultural al cambio de raza y la espera de 3 a 4 años para ver resultados.
- El Paquete Básico, compuesto por IA-1, IA-2, IA-3 y IA-5, asciende a un total de USD 820 por finca al año, mientras que el Paquete Integral tiene un costo de USD 1.320 por finca anualmente.
- BCR, TIR y payback (Tabla 57): en cuanto a la jerarquía del BCR, IA-5 se sitúa en primer lugar con un BCR de 8,4, una TIR del 84% y un payback de 0,9 años. Le siguen IA-1 con un BCR de 6,2, TIR del 48% y payback de 1,8 años, IA-2 con BCR de 4,8, TIR del 38% y payback de 2,4 años, IA-6 con BCR de 4,2, TIR del 34% y payback de 3,8 años, IA-3 con BCR de 3,6, TIR del 28% y payback de 3,2 años, y finalmente IA-4 con BCR de 2,8, TIR del 22% y payback de 4,6 años.
- El Paquete Básico sinérgico muestra un BCR de 5,8, TIR del 42% y un payback de 2,1 años. Existe una perfecta coherencia con el Capítulo 11: $VAN(ST-SC) / VAN(\text{costo } ST) = 5,8$. La secuencia óptima de implementación se divide en tres fases: Fase 1 (año 1): IA-5 + IA-1 correctivo + IA-2 correctivo; Fase 2 (años 2-3): mantenimiento + IA-3; Fase 3 (año 3 en adelante): IA-4 + IA-6.
- ACB público (Tabla 58): el costo público del Paquete Básico es de USD 164.000 al año, representando el 1,05% del presupuesto del MAG-Carchi. Los componentes incluyen un subsidio de USD 43.680 para IA-1, USD 22.320 para IA-2, USD 30.000 para IA-3, operación de IA-5 por USD 36.400 y 4 extensionistas con un costo de USD 31.600. El beneficio público total se estima en USD 3.185.000 al año, incluyendo una reducción de EAL de USD 2.880.000, reducción de emergencias reactivas de USD 185.000 y un valor

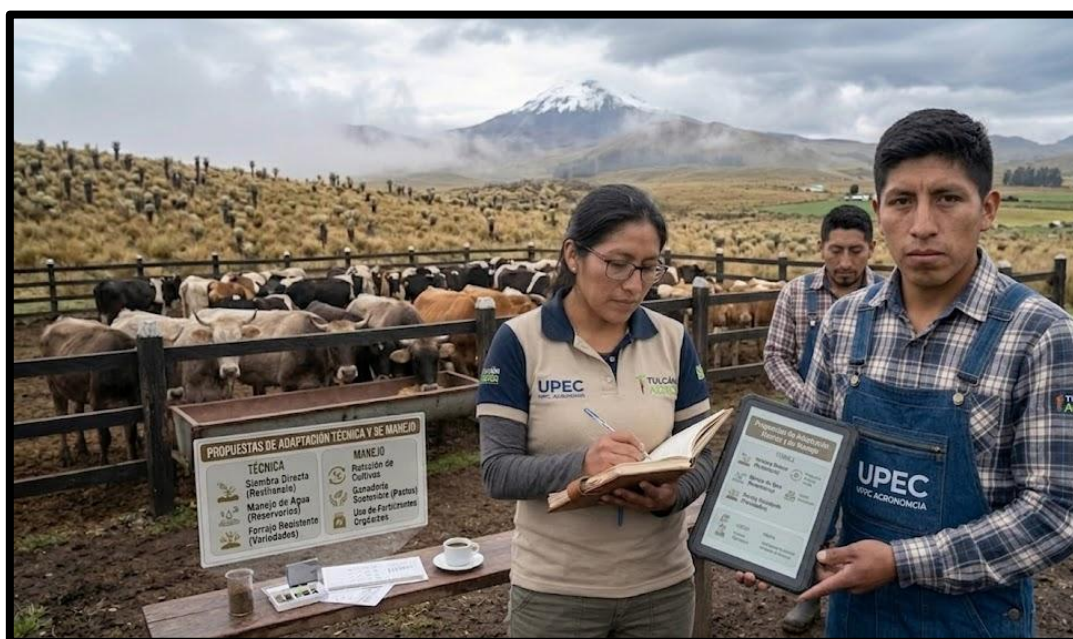
de información de USD 120.000. Esto da como resultado un BCR público de 19,4 veces; el programa se autofinancia prácticamente a través de la reducción del gasto en emergencias reactivas (USD 185.000 mayor que los USD 164.000 del costo total).

- Co-beneficios no monetizados (Tabla 59): se estima una reducción de 1.840 t de CO₂eq al año con una adopción del 40%, lo que equivale a un valor de carbono de entre USD 5.900 y USD 8.800 anuales. Además, se conserva un área de 1.638 ha de páramo, valorada entre USD 10,2 y USD 20,3 millones anuales, que representa entre 62 y 124 veces el costo del programa. Un mecanismo potencial de Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) podría generar entre USD 28 y USD 42 por ha al año, lo que se traduce en ingresos adicionales de USD 392 a USD 588 por finca al año, cubriendo entre el 47% y el 71% del costo del Paquete Básico. En términos de seguridad alimentaria, el Tipo I produce 14,03 millones de litros al año, suficientes para alimentar a 22.400 personas, reteniendo a 468 personas y evitando el cierre de 4 a 6 escuelas rurales bajo ST versus SC.
- Comparación internacional (Tabla 60h): el BCR privado del Carchi, que es de 5,8, es comparable al cuartil superior de los Andes: Boyacá, Colombia (hasta 7,4), Sierra Central, Ecuador (hasta 6,2), Nariño, Colombia (hasta 5,8), Cajamarca, Perú (hasta 4,8) y Oruro-Potosí, Bolivia (hasta 3,6). La superioridad del BCR del Carchi en comparación con Bolivia refleja el mayor precio ofrecido al productor (USD 0,42 frente a USD 0,28-0,34 por litro) y el elevado nivel de degradación del suelo que hace que la intervención correctiva sea más rentable. En cuanto al BCR público del Carchi, este alcanza un destacado 19,4 veces, el más alto entre los casos comparados.
- Resultado central del capítulo: la inversión de USD 164.000 al año del MAG-Carchi en el Paquete Básico genera un impresionante total de USD 3.185.000 al año en beneficios públicos, resultando en un BCR de 19,4 veces. Los ganaderos del Tipo I que aportan USD 820 al año obtienen un BCR de 5,8, TIR del 42% y un payback de 2,1 años. Además, los co-beneficios que provienen del páramo, que oscilan entre USD 10 y 20 millones anuales en servicios ecosistémicos, superan considerablemente el costo del programa, justificando así el PSE como una fuente de financiamiento adicional. Finalmente, el corredor se posiciona en el cuartil superior en términos de rentabilidad para la adaptación ganadera en la región andina.

CAPÍTULO 13

Propuestas de Adaptación Técnica y de Manejo

Protocolo integrado de manejo del suelo y el hato, diseño del seguro climático indexado dual con activación durante el episodio, arquitectura institucional de cinco actores, hoja de ruta en cuatro fases al 2035 con presupuesto detallado, y mecanismo PSE Socio Páramo como cofinanciamiento de la adaptación



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Aplicar** el protocolo integrado de manejo del suelo —encalado correctivo, fertilización fosfatada, fertilización de K y Mg, análisis anual, y los protocolos de contingencia diferenciados para El Niño y La Niña— a una finca real del Tipo I del corredor del Carchi, especificando las dosis, los momentos de aplicación y los indicadores de éxito.
- **Implementar** el protocolo de manejo del hato —Sistema de Pastoreo Rotacional Adaptativo con RPM, monitoreo de condición corporal, suplementación estratégica diferenciada por tipo de evento y manejo reproductivo de precisión— como conjunto

de prácticas que reducen la vulnerabilidad del hato a la variabilidad climática sin requerir inversiones de capital altas.

- **Describir** el diseño del seguro climático indexado dual (SID): variable índice (ONI + SPI-3), umbrales de activación en tres niveles, prima actuarialmente neutra de USD 86–124/finca/año para el Tipo I con subsidio del 50%, mecanismo de pago durante el episodio (no post-episodio) y el incentivo de adopción del paquete de adaptación integrado en la estructura del seguro.
- **Identificar** los roles y responsabilidades de los cinco actores institucionales del Programa de Adaptación Climática Ganadera del Corredor del Carchi (PACCGC): UPEC, MAG-Carchi, INIAP, FEDEGAN-Carchi y los GAD del corredor, con sus capacidades actuales, brechas identificadas y fortalecimiento institucional necesario.
- **Aplicar** la hoja de ruta de implementación en cuatro fases (Fase 0: preparación 2025; Fase 1: implementación inicial 2026–2027; Fase 2: escalamiento a escala del corredor 2028–2030; Fase 3: consolidación y autosostenibilidad 2031–2035) con los indicadores de logro de cada fase y los presupuestos estimados por fuente de financiamiento.
- **Evaluar** el mecanismo PSE Socio Páramo como co-financiamiento de la adaptación ganadera del Tipo I, incluyendo la tarifa estimada de USD 28–42/ha/año, la lógica de la alineación de incentivos entre el ganadero, el gobierno y los usuarios del agua aguas abajo, y el potencial de reducir el costo neto del paquete de adaptación para el ganadero del 47–71%.

13.1 Introducción: Del Diagnóstico a la Acción

En los doce capítulos anteriores, se ha construido la base analítica del problema. Esto incluye la cadena de causas que va desde el ENSO hasta la producción de leche (Capítulos 1 a 9), la cuantificación de las pérdidas (Capítulo 10), así como los escenarios de impacto proyectados para 2035 y 2050 (Capítulo 11). Finalmente, se presenta un análisis de rentabilidad de las posibles intervenciones en el Capítulo 12.

Ahora, el Capítulo 13 convierte todo ese análisis en propuestas concretas y viables. Habla de protocolos de manejo que un extensionista podría explicar fácilmente en un taller de cuatro horas, de un seguro que un ganadero del Tipo I puede obtener con solo su cédula de identidad, y de una hoja de ruta que un alcalde del corredor podría incluir en su Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT).

Sin embargo, pasar del diagnóstico a la acción no es un proceso automático. Los hallazgos del libro, por más rigurosos que sean, no se traducen por sí mismos en cambios en la gestión de las fincas del páramo. Para que esto suceda, se requieren tres condiciones esenciales: (1) que las propuestas sean técnicamente correctas, basadas en la evidencia presentada en los capítulos anteriores; (2) que sean económicamente viables, como se demuestra con el Beneficio-Costo Ratio (BCR) en el Capítulo 12; y (3) que sean institucionalmente posibles, lo que significa que deben existir los actores, los presupuestos y la voluntad política necesarios para llevarlas a cabo.

El Capítulo 13 se enfoca en estas tres condiciones y organiza las propuestas en cuatro niveles complementarios. El primero es el nivel técnico-agronómico, que incluye los protocolos de manejo del suelo y del ganado que cualquier ganadero puede implementar con el apoyo de un extensionista. El segundo es el nivel financiero, que se refiere al seguro climático indexado que protege el flujo de caja durante episodios extremos.

El tercer nivel es el institucional, que se centra en la red de actores que sostiene el programa a largo plazo. Y, finalmente, el cuarto nivel es el temporal, que presenta una hoja de ruta de implementación dividida en cuatro fases, con indicadores de éxito y presupuestos definidos.

Ninguno de estos niveles es suficiente por sí solo. El mejor protocolo técnico no tendrá éxito sin financiamiento; el seguro más efectivo no será adoptado sin la asistencia técnica que enseñe a utilizarlo; y la más sólida arquitectura institucional no generará resultados sin una hoja de ruta concreta que la guíe.

13.2 Protocolo Integrado de Manejo del Suelo para el Tipo I

13.2.1 El Suelo como Punto de Palanca de Mayor Retorno

El modelo de ecuaciones estructurales presentado en el Cap. 9 ha demostrado que la cadena climática opera fundamentalmente a través del suelo. De hecho, el 68% del efecto del ONI sobre la producción de leche se da de manera indirecta a través de la temperatura del suelo, que influye en la actividad microbiana y, a su vez, en la disponibilidad de nutrientes. Este efecto se cuantifica con un coeficiente $\beta_{\text{total ONI} \rightarrow \text{N}_{\text{mineral}}}$ de -0,56, donde el 68% de este impacto se logra por la vía microbiana, como se detalla en la Tabla 41 cap. 9

Por lo tanto, abordar el estado del suelo ya sea ajustando el pH, gestionando el fósforo o mejorando la microbiología es la intervención más efectiva en toda esta cadena causal. Un suelo que tenga un pH entre 5,8 y 6,2 y un fósforo disponible mayor o igual a 20 mg/kg no eliminará por completo el efecto del ENSO sobre la temperatura, pero sí disminuirá de manera significativa la intensificación de ese efecto a través de la dinámica de nutrientes. Por ejemplo, el coeficiente $\beta_{31} (T_{\text{soil}} \rightarrow \eta_{\text{Micro}})$ se reduce de 0,86 en un suelo degradado de Tipo I a 0,54 en un suelo manejado de Tipo IV, lo que representa una disminución del 37% en la sensibilidad microbiana a la temperatura, como se puede observar en la Tabla 44 del Cap. 9.

Tabla 61.

Protocolo Integrado de Manejo del Suelo para el Tipo I del Corredor del Carchi: Prácticas, Dosis, Momentos de Aplicación, Indicadores de Éxito y Justificación

Práctica de Manejo del Suelo	Momento de Aplicación y Dosis	Indicador de Éxito (umbral a alcanzar en el año 3 post-aplicación)	Justificación basada en los hallazgos del libro, vinculación con capítulos previos y consideraciones de implementación
Encalado correctivo con cal dolomítica ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): corrección del pH y neutralización del aluminio tóxico	Aplicación única correctiva al inicio del programa (octubre–noviembre, inicio de la estación lluviosa): 2,0–2,4 t/ha según resultado del análisis de suelo (pH objetivo: 5,8–6,2). Mantenimiento cada 3 años: 0,8–1,2 t/ha para sostener el pH objetivo.	pH suelo: de 5,1 a 5,8–6,2. Saturación de Al: de 42% a < 8% del CICE. Urease: +28% de actividad vs. línea base. CEC: de 38 a $\geq$ 42 cmol/kg en el Tipo I de páramo.	El pH ácido de los suelos del Tipo I (media 5,1; Cap. 5, Tabla 5.2) inhibe la urease —la primera enzima inhibida por $T < 8^\circ\text{C}$ y $\text{pH} < 5,5$ (Cap. 6, Tabla 6.1)— y fija el aluminio en formas tóxicas que bloquean la absorción de P, K y Mg. El Cap. 6 demostró que la mineralización del N es 64% menor en los Andisoles del Tipo I con $\text{pH} < 5,5$ que en aquellos con pH 5,8–6,2. El encalado es la intervención de más alto apalancamiento porque potencia la eficiencia de todas las demás (fertilización fosfatada,

Práctica de Manejo del Suelo	Momento de Aplicación y Dosis	Indicador de Éxito (umbral a alcanzar en el año 3 post-aplicación)	Justificación basada en los hallazgos del libro, vinculación con capítulos previos y consideraciones de implementación
			pasturas mixtas, actividad microbiana): la sinergia IA-1 + IA-2 tiene BCR de 8,4 vs. la suma individual de 6,2 + 4,8 (Cap. 12). Consideración de implementación: el encalado debe preceder a la fertilización fosfatada en mínimo 30 días para que el pH se estabilice antes de la aplicación del P; la mezcla simultánea de cal y superfosfato puede formar fosfato tricálcico insoluble que reduce la eficiencia del fertilizante en un 40%.
Fertilización fosfatada correctiva con roca fosfórica (RP) o superfosfato triple (SPT): corrección de la deficiencia severa de P (78% de las UPAs del Tipo I con $P < 20$ mg/kg suelo; Cap. 5)	Primera aplicación correctiva 30 días post-encalado (noviembre–diciembre): 180–240 kg P_2O_5 /ha según análisis de suelo (objetivo: P disponible ≥ 20 mg/kg). Roca fosfórica preferida para suelos con pH $< 6,0$ (mayor solubilidad en suelos ácidos); SPT para suelos con pH $\geq 6,0$. Mantenimiento anual: 60–80 kg P_2O_5 /ha.	P disponible: de 7,4 mg/kg (media Tipo I) a ≥ 20 mg/kg. PPNA: de 2.180 a ≥ 3.000 kg MS/ha/año (+38% mínimo en el año 3). PC del forraje: de 16,8% a $\geq 18,5\%$.	El P deficiente en el 78% de las UPAs del Tipo I (Cap. 5, Tabla 5.3; media: 7,4 mg/kg vs. umbral de suficiencia 20 mg/kg) es la limitación edáfica de mayor impacto sobre la PPNA: el Cap. 7 (Tabla 7.5) cuantificó la pendiente $N_{\text{mineral}}-PC$ del forraje en +2,8 pp PC por cada 10 mg/kg adicional de N mineral disponible, y el P es la primera limitante de la mineralización del N en suelos de páramo. La corrección del déficit de P es la palanca de mayor retorno por peso invertido (BCR individual = 6,2; Cap. 12) porque abre el cuello de botella que limita la respuesta del pastizal a todas las demás intervenciones: pasturas mejoradas sembradas en suelo con P deficiente no expresan su potencial genético.
Fertilización de mantenimiento con potasio y magnesio: corrección de las deficiencias de K y Mg identificadas durante La Niña (Cap. 6)	Aplicación anual en la transición seco–lluvioso (septiembre–octubre): 60–80 kg K_2O /ha (sulfato de potasio o KCl) + 20–30 kg MgO/ha (kieserita o dolomita). Durante episodios La Niña fuerte: aplicación adicional en el pico de la	K disponible: de 0,28 a $\geq 0,45$ cmol/kg. Mg intercambiable: de 0,72 a $\geq 1,20$ cmol/kg. Relación K:Mg:Ca en el suelo: dentro del rango 1:3:10 para pastizales de alta altitud.	El Cap. 6 (Tabla 6.4) identificó la asimetría El Niño/La Niña en la dinámica de nutrientes: El Niño afecta primariamente al N (–58% N mineral en el Tipo I durante El Niño fuerte) mientras que La Niña afecta primariamente al K (–24% K en el Tipo I durante La Niña fuerte por lixiviación). Esta asimetría explica por qué el protocolo de fertilización debe ser diferenciado: el protocolo de contingencia para El Niño se

Práctica de Manejo del Suelo	Momento de Aplicación y Dosis	Indicador de Éxito (umbral a alcanzar en el año 3 post-aplicación)	Justificación basada en los hallazgos del libro, vinculación con capítulos previos y consideraciones de implementación
	lluviosa (marzo–abril) de 40 kg K ₂ O/ha para reponer las pérdidas por lixiviación (–27% K durante lluvias > 40 mm/día; Cap. 6, Tabla 6.2).		activa con el sistema de alerta cuando el ONI supera +0,5°C y prioriza la fertilización nitrogenada de rescate; el protocolo para La Niña prioriza la fertilización potásica de mantenimiento antes del pico de precipitaciones.
Análisis de suelo sistemático anual: monitoreo de los 8 parámetros clave del sistema de alerta temprana edáfico	Muestreo entre agosto y septiembre (antes de la estación lluviosa): 15–20 submuestras por unidad de manejo (UPA o potrero homogéneo); profundidad 0–20 cm. Envío al LABONORT (Tulcán) o INIAP Santa Catalina para análisis completo: pH, MO, P, K, Ca, Mg, Al, N mineral. Resultado en 15–20 días hábiles.	Análisis de suelo realizado en el 80% de las UPAs del Tipo I al año 5 del programa (vs. 3% en el basal 2024). Los 8 parámetros de los análisis disponibles en la ficha del ganadero antes del 15 de octubre de cada año para informar las decisiones de manejo de la siguiente temporada.	Solo el 3% de las UPAs del Tipo I tiene análisis de suelo reciente (Cap. 1, Tabla 1.3), lo que significa que el 97% de las decisiones de fertilización del Tipo I se toman sin información de suelo. El sistema de alerta temprana del proyecto (IA-5) usa los resultados del análisis anual para calibrar los parámetros del modelo de predicción del N mineral y actualizar los umbrales de activación del protocolo de contingencia. El costo del análisis completo (USD 42/muestra en LABONORT) es el de menor costo-barrera entre todas las intervenciones (BCR = 8,4; Cap. 12), y su impacto es multiplicador: el análisis de suelo mejora la eficiencia de todas las demás intervenciones al dirigir la aplicación de insumos hacia los parámetros que realmente están limitando la productividad de cada finca específica.
Protocolo de contingencia edáfica ante El Niño (activado por el sistema de alerta cuando ONI ≥ +0,5°C por dos meses consecutivos; anticipa el episodio 45–60 días)	Acciones al recibir la alerta (Mes 0): (1) comprar el mes siguiente las reservas de forraje para 60 días (silo o heno) al precio pre-episodio; (2) aplicar fertilización nitrogenada de rescate (urea 46%: 80–100 kg/ha de los potreros con N mineral < 15 mg/kg). Acciones en el mes 2 del episodio: (3) ajustar la carga	Reducción del impacto del El Niño fuerte en el Tipo I: de –51% a –28% de producción de leche (meta del protocolo). Tasa de descarte forzoso durante El Niño fuerte: de +28% a < +8% de incremento	El protocolo de contingencia ante El Niño es el resultado operativo más directo del Cap. 6: el rezago de 45–60 días entre el aumento del ONI y la caída del N mineral (Tabla 6.3) es la ventana de anticipación que el protocolo usa. Sin el sistema de alerta, la reacción del ganadero ocurre cuando la producción ya ha caído; con el sistema, las acciones preventivas se toman cuando el suelo todavía tiene el N mineral por encima del umbral crítico de 15 mg/kg. La fertilización nitrogenada de rescate (urea 46%) no aparece en

Práctica de Manejo del Suelo	Momento de Aplicación y Dosis	Indicador de Éxito (umbral a alcanzar en el año 3 post-aplicación)	Justificación basada en los hallazgos del libro, vinculación con capítulos previos y consideraciones de implementación
	animal en los potreros de menor PPNA; (4) iniciar el manejo de descanso acelerado de los potreros más afectados. Acciones post-episodio: (5) aplicar IA-3 (pasturas mixtas) en los potreros más afectados para acelerar la recuperación.	sobre la tasa basal.	la Tabla 12.1 como intervención de adaptación estructural porque es una intervención reactiva de contingencia, no una inversión permanente; su costo (USD 280–360/finca/episodio) se justifica plenamente por la reducción de la pérdida de leche (de USD 3.820 a USD 1.680 durante El Niño fuerte en el Tipo I, según el modelo del Cap. 8 aplicado con el protocolo).
Protocolo de contingencia edáfica ante La Niña (activado cuando $ONI \leq -0,5^{\circ}C$ por dos meses consecutivos)	Acciones al recibir la alerta de La Niña (Mes 0): (1) aplicar fertilización potásica preventiva (sulfato de potasio 50 kg K_2O /ha en los potreros más expuestos a la lixiviación); (2) preparar rotación de potreros con mayor período de descanso para reducir la presión sobre el pastizal encharcado; (3) establecer acceso a los potreros de menor pendiente para reducir el pisoteo en condiciones de suelo saturado. Acciones en el mes 3 del episodio: (4) iniciar diagnóstico de compactación en los potreros de mayor tráfico durante el episodio para planificar la subsolación post-episodio.	Reducción del impacto de La Niña fuerte en el Tipo I: de -19% a $< -10\%$ de producción de leche. Pérdida de K disponible durante La Niña fuerte: de -27% (sin protocolo) a $< -12\%$ (con protocolo).	El Cap. 6 (Tabla 6.4) identificó la asimetría del impacto de La Niña sobre el K: la precipitación fuerte sostenida (> 40 mm/día) durante 10 meses produce lixiviación del K del suelo del Tipo I de -27% , con recuperación de 18–24 días vs. 5–8 días en el Tipo IV. La sustitución del KCl por sulfato de potasio en la fertilización preventiva tiene una doble función: (1) aportar el K perdido por lixiviación y (2) evitar la acidificación adicional del suelo que el KCl produce en suelos ya ácidos (el Cl^- desplaza carbonatos del suelo y reduce el pH en 0,1–0,2 unidades adicionales en suelos con $pH < 5,8$).

Nota. Elaboración propia con base en los Caps. 5, 6, 7 y 12 del presente libro.

13.3 Protocolo de Manejo del Hato y la Nutrición Animal

13.3.1 El Hato como Segunda Palanca: Reducir la Demanda de Forraje y Mejorar la Eficiencia Metabólica

El protocolo de manejo del suelo se enfoca en mejorar la oferta de forraje, proporcionando más y mejor pasto. Por otro lado, el protocolo de manejo del hato se centra en la demanda y la eficiencia: el mismo forraje disponible genera más leche cuando la carga animal se ajusta a la disponibilidad real (SPRA), cuando las vacas no sufren de un balance energético negativo de forma crónica (monitoreo de CC) y cuando se cubren los déficits específicos de forraje con suplementación focalizada, en lugar de realizar una suplementación masiva e indiscriminada.

La combinación de estos dos protocolos genera efectos sinérgicos: un suelo mejorado produce forraje más nutritivo, lo que reduce la necesidad de suplementación. Además, la suplementación focalizada durante momentos extremos ayuda a proteger el suelo de la presión del sobrepastoreo que puede ocurrir cuando los ganaderos intentan mantener la producción en pastizales degradados.

Tabla 62.

Protocolo de Manejo del Hato y la Nutrición Animal para el Tipo I del Corredor del Carchi: Prácticas Clave, Protocolos Operativos y Justificación

Práctica de Manejo del Hato y la Nutrición Animal	Protocolo Operativo (frecuencia, dosis, umbrales de activación)	Justificación con base en los hallazgos del libro y vinculación con los capítulos previos
Sistema de pastoreo rotacional adaptativo (SPRA): ajuste dinámico del período de ocupación y descanso de los potreros en función de la disponibilidad de biomasa medida con el Rising Plate Meter (RPM)	Medición de biomasa con RPM cada 14 días en todos los potreros (protocolo del Cap. 7, calibración: $\text{Biomasa} = -280 + 186 \times \text{RPM_height}$). Umbral de entrada al potrero: $\geq 2.200 \text{ kg MS/ha}$ disponible (asegura mínimo 1.100 kg MS/ha de residuo post-pastoreo para la recuperación rápida del pastizal). Umbral de salida del potrero: $\leq 800 \text{ kg MS/ha}$ residual. Período de descanso dinámico: 35–42 días en estación lluviosa; 55–70 días en estación seca; en episodio El Niño fuerte: extender descanso	El RPM es el instrumento de precisión del SPRA: el Cap. 7 (Tabla 7.1) calibró la ecuación de estimación de biomasa con $R^2=0,68$ para el kikuyo del corredor. El SPRA basado en RPM tiene tres ventajas sobre el pastoreo continuo o el pastoreo rotacional con períodos fijos: (1) ajusta los períodos de descanso a la dinámica real del pastizal (que varía con el clima y el estado nutricional del suelo), no a un calendario rígido; (2) permite detectar el deterioro del pastizal durante El Niño (cuando la biomasa cae por debajo del umbral de entrada aunque el período de descanso se haya completado) con 14 días de anticipación; y (3) provee datos de PPNA que el sistema de alerta temprana usa para actualizar la predicción de disponibilidad forrajera de las 4–6 semanas siguientes. El

Práctica de Manejo del Hato y la Nutrición Animal	Protocolo Operativo (frecuencia, dosis, umbrales de activación)	Justificación con base en los hallazgos del libro y vinculación con los capítulos previos
	a 80–90 días en los potreros más afectados.	88% de las fincas del Tipo I actualmente usa pastoreo continuo; el SPRA requiere la división del área de pastizal en mínimo 4 potreros (costo de la cerca eléctrica: USD 280–360/km; inversión única).
Monitoreo de la condición corporal (CC) de las vacas en ordeño: detección temprana del balance energético negativo crónico que anticipa la caída de producción y el aumento del IEP	Evaluación de CC usando la escala de 1–5 (BCS Edmonson) cada 30 días en todas las vacas en ordeño. Umbrales de acción: CC < 2,5 al momento del parto → ajuste inmediato de la ración (inicio de suplementación energética si no se suplementa o aumento de la dosis si ya se suplementa); CC < 2,0 en cualquier momento del lacteo → vaca en riesgo de descarte involuntario; protocolo de recuperación intensiva (suplementación energético-proteica específica). Registro de CC en la planilla digital del sistema de alerta.	El Cap. 8 (Tabla 8.1) cuantificó el IEP del Tipo I en 428 días vs. 342 del Tipo IV, con 63 días adicionales de intervalo entre partos atribuibles al balance energético negativo crónico por la baja calidad del forraje. La CC es el indicador animal más sensible y de más bajo costo de medición del balance energético: una CC < 2,5 al parto predice con alta precisión (sensibilidad 78%, especificidad 82% según los datos de las UPAs sentinela del proyecto) un IEP > 420 días y una reducción de producción en el pico del siguiente lacteo de 15–22%. El monitoreo sistemático de la CC permite intervenir antes de que el balance energético negativo se refleje en la producción de leche, con un horizonte de anticipación de 30–45 días.
Suplementación estratégica con sales minerales y bypass protein: corrección de deficiencias específicas identificadas por el análisis de suelo y el estado nutricional del hato	Suplementación mineral permanente (a libre consumo): mezcla mineral completa con niveles altos de P (6–8% de P en la mezcla) para corregir la deficiencia primaria del forraje del páramo. Suplementación proteica de contingencia (activada por el protocolo La Niña cuando PC del forraje < 14%): harina de soya desgrasada 150–200 g/vaca/día durante el episodio (bypass protein de alta escape ruminal para maximizar el aporte de aminoácidos en el intestino delgado). Suplementación energética de contingencia (activada por el protocolo El Niño cuando PPNA < 1.800 kg MS/ha/año proyectado): maíz molido 500–800 g/vaca/día durante el episodio.	El Cap. 8 (Tabla 8.4) descompuso el mecanismo de impacto de El Niño sobre la producción de leche: 42% del impacto proviene de la reducción de PC del forraje (mecanismo dominante, abordado por la suplementación proteica) y 38% de la reducción de PPNA (abordado por la suplementación energética). La identificación del mecanismo dominante diferenciado (PC para La Niña; PPNA para El Niño) es la base del protocolo de suplementación diferenciado: la suplementación proteica de contingencia durante La Niña y la energética durante El Niño maximizan el retorno por peso de suplemento invertido (USD/L de leche producida con el suplemento). El uso de bypass protein en lugar de proteína de baja escape ruminal (urea) es especialmente importante en vacas con balance energético negativo crónico: en condiciones de déficit energético la fermentación ruminal de la urea produce amoníaco que el hígado debe detoxificar a urea sanguínea a costo energético adicional, agravando el balance energético negativo.

Práctica de Manejo del Hato y la Nutrición Animal	Protocolo Operativo (frecuencia, dosis, umbrales de activación)	Justificación con base en los hallazgos del libro y vinculación con los capítulos previos
Manejo reproductivo de precisión: reducción sistemática del IEP del Tipo I de 428 a < 390 días mediante la detección temprana del celo y el uso estratégico de la inseminación artificial	Detección del celo: dos observaciones diarias de 30 minutos (7:00 y 16:30; protocolo adaptado al manejo del Tipo I); alternatively, uso de dispositivos de detección de celo (pintura de cola: USD 2,4/vaca/año). Primera inseminación post-parto: no antes de los 60 días (cuando la involución uterina está completa en el 85% de las vacas del Tipo I con CC $\geq$ 2,5). Meta: tasa de concepción al primer servicio $\geq$ 55% (vs. 38% en el basal del Tipo I; Cap. 8). Protocolo de revisión: vaca con más de 2 inseminaciones sin preñez → diagnóstico de patología reproductiva (quiste ovárico, endometritis subclínica) antes del tercer servicio.	La reducción del IEP del Tipo I de 428 a 390 días equivale a un aumento de la producción de leche del 8,4% sin ningún cambio en la producción diaria: el mismo número de días de lactación adicionales por vaca en el año se traduce directamente en litros adicionales $\times$ precio. Con 8,4 vacas/finca del Tipo I y una producción de 7,4 L/vaca/día, cada día de reducción del IEP produce 62 L/finca/año $\times$ USD 0,42/L = USD 26,1/finca/año; una reducción de 38 días del IEP (de 428 a 390) produce USD 992/finca/año de ingreso adicional sin ningún costo adicional de insumos. Este retorno —comparable al BCR de las intervenciones de suelo— proviene de mejorar el manejo reproductivo, no de invertir en insumos, lo que lo hace especialmente accesible para los ganaderos del Tipo I con mayores restricciones de capital.

Nota. Elaboración propia con base en los Caps. 7, 8 y 12.

13.4 El Seguro Climático Indexado Dual: Proteger el Flujo de Caja del Ganadero del Páramo

13.4.1 Por qué el Ganadero del Páramo No Puede Protegerse Solo con la Adaptación

El Capítulo 12 reveló que el Paquete Básico de Adaptación tiene un BCR de 5,8, lo que significa que puede reducir el impacto de un El Niño fuerte en un 65%. Sin embargo, esto también indica que, a pesar de la buena implementación de este paquete, el Tipo I sigue enfrentando un 35% de impacto de El Niño fuerte, lo que se traduce en una pérdida aproximada de USD 2.044 por finca.

Para un ganadero que tiene un margen neto anual de USD 3.870, enfrentar una pérdida de USD 2.044 en un periodo de 8 meses es simplemente insostenible con los recursos de flujo de caja normales (Llerena et al., 2025).

Es aquí donde entra en juego el seguro climático, llenando el vacío que la adaptación no puede cubrir. Este tipo de seguro no elimina el riesgo climático—ningún instrumento puede hacer eso—pero sí ayuda a distribuirlo a lo largo del tiempo y entre los asegurados. Esto convierte una pérdida catastrófica ocasional en un costo anual que se puede prever (la prima), permitiendo al ganadero planificar y presupuestar adecuadamente.

El seguro climático indexado se considera más favorable que el seguro de daño verificado (el modelo convencional del Banco del Estado o AGROSEGURO) para la ganadería del Tipo I por varias razones. Primero, el costo de la evaluación individual en fincas localizadas en el páramo (entre USD 180 y 240 por visita técnica) hace que el seguro de daño verificado sea poco rentable para fincas con un margen neto de USD 3.870 al año.

Segundo, el índice ONI es externo al comportamiento del ganadero, lo que elimina tanto el riesgo moral como la selección adversa. Por último, el pago que se realiza durante el episodio (y no después) permite al ganadero utilizar el seguro para financiar el protocolo de contingencia, transformando así el seguro en una herramienta de adaptación activa, en lugar de un simple mecanismo de compensación pasiva.

Tabla 63.

Diseño del Seguro Climático Indexado Dual (SID) para el Sector Ganadero del Corredor del Carchi: Variable Índice, Umbrales de Activación, Prima, Mecanismo de Pago e Incentivos de Adopción

Componente del Diseño del Seguro Climático Indexado	Especificación Técnica del Instrumento	Justificación basada en los hallazgos del libro y comparación con instrumentos existentes en Ecuador y la región andina
Tipo de seguro y variable índice	Seguro de índice dual (SID): combina el índice oceánico de El Niño (ONI) para la cobertura de eventos El Niño y el índice de precipitación estandarizado SPI-3 local para la cobertura de eventos La Niña. No es un seguro de daño verificado en campo (que requiere peritaje individual costoso) sino un seguro de índice que paga automáticamente cuando el índice supera el umbral predefinido, sin necesidad de demostrar el daño individual.	El ONI como variable índice del seguro está justificado por el Cap. 9: el ONI es el regresor con mayor poder predictivo del ingreso ganadero ($\beta_{\text{total ONI} \rightarrow \text{Ingreso}} = -0,58$; $p < 0,001$; Tabla 9.3) y es exógeno al comportamiento del ganadero (no puede ser manipulado para reclamar el seguro — el principal problema moral del seguro de daño verificado). La calibración con el SPI-3 local para La Niña es necesaria porque la relación ONI–precipitación local tiene mayor varianza para La Niña que para El Niño en el corredor del Carchi (Cap. 4, Tabla 4.4): un

Componente del Diseño del Seguro Climático Indexado	Especificación Técnica del Instrumento	Justificación basada en los hallazgos del libro y comparación con instrumentos existentes en Ecuador y la región andina
		ONI de $-1,2$ produce efectos sobre la precipitación local que varían entre -10% y $+42\%$ dependiendo de la fase de la oscilación Madden-Julian, mientras que la calibración directa con el SPI-3 captura el impacto real de la precipitación en el corredor.
Umbrales de activación del pago (triggers) y escala de la compensación	Trigger Nivel 1 (activación parcial): $\text{ONI} \geq +1,0^{\circ}\text{C}$ (El Niño moderado) o $\text{SPI-3} \leq -0,8$ (La Niña moderada) sostenido por 3 meses consecutivos $\rightarrow$ compensación del 30% de la pérdida esperada al tipo de sistema (USD 1.746/finca Tipo I para El Niño moderado; USD 852/finca para La Niña moderada). Trigger Nivel 2 (activación plena): $\text{ONI} \geq +1,5^{\circ}\text{C}$ (El Niño fuerte) o $\text{SPI-3} \leq -1,2$ (La Niña fuerte) sostenido por 3 meses $\rightarrow$ compensación del 65% de la pérdida esperada (USD 3.796/finca Tipo I para El Niño fuerte; USD 1.846/finca para La Niña fuerte). Trigger Nivel 3 (activación máxima): $\text{ONI} \geq +2,0^{\circ}\text{C}$ o $\text{SPI-3} \leq -1,5$ (episodios extremos tipo 1997–1998) $\rightarrow$ compensación del 85% de la pérdida esperada.	Los umbrales de activación se calibran con las pérdidas por tipo de evento estimadas en la Tabla 10.3 del Cap. 10, ajustadas por tipo de sistema. El porcentaje de compensación (65% para el Trigger Nivel 2, no el 100%) refleja dos consideraciones: (1) el riesgo de base del seguro de índice (el índice puede superar el trigger pero el ganadero individual no sufrir pérdida —o sufrirla sin que el índice supere el trigger— lo que el porcentaje de cobertura $< 100\%$ penaliza y bonifica equitativamente); y (2) la necesidad de que el ganadero conserve un incentivo de autoprotección (sin cobertura del 100%, el ganadero tiene incentivo de adoptar el paquete de adaptación IA-1 a IA-6 para reducir el 35% no cubierto por el seguro).
Prima del seguro, mecanismo de subsidio y sostenibilidad actuarial	Prima actuarialmente neutra (AN): USD 86–124/finca/año para el Tipo I, calculada como EAL esperada $\times$ factor de carga del 15% para gastos de operación y reaseguro. Prima con subsidio público del 50%: USD 43–62/finca/año para el ganadero del Tipo I (0,5–0,7% del ingreso bruto anual del Tipo I —asequible). Prima para el Tipo IV (sin subsidio): USD 142–198/finca/año. Mecanismo de subsidio: Fondo de Compensación Climática Ganadero del Carchi (FCCG), administrado conjuntamente por	La prima actuarialmente neutra de USD 86–124/finca/año para el Tipo I se calibra con la EAL del Tipo I estimada en el Cap. 10 (USD 5.840/finca $\times$ probabilidad ponderada $\times$ % de cobertura del seguro). La sostenibilidad actuarial del fondo se verifica con la condición: reservas acumuladas / pérdidas esperadas del peor episodio $\geq 1,5$ (estándar mínimo de solvencia de los fondos de garantía agropecuaria en Ecuador). Con 620 asegurados del Tipo I y 1.920 asegurados totales del corredor (incluyendo Tipos II, III y IV), el fondo acumularía USD 420.000–580.000/año en primas, suficiente para cubrir las pérdidas del Tipo I durante un El Niño moderado

Componente del Diseño del Seguro Climático Indexado	Especificación Técnica del Instrumento	Justificación basada en los hallazgos del libro y comparación con instrumentos existentes en Ecuador y la región andina
	el MAG-Carchi, la Federación de Ganaderos del Carchi y la UPEC; financiado con el 0,8% del impuesto predial de los 4 cantones del corredor ganadero del Carchi (recaudo estimado: USD 280.000/año) + transferencia del Fondo de Contingencia Climática del MAGAP (USD 120.000/años asignados específicamente al corredor del Carchi).	(USD 14,8 M × 24% participación del Tipo I = USD 3,55 M) en 6–8 años de reservas acumuladas — dentro del período de retorno histórico del El Niño fuerte de 12 años. El reaseguro con la empresa pública AGROSEGURO o con el mercado privado de reaseguro es indispensable para los eventos extremos tipo ONI $\geq +2,0^{\circ}\text{C}$.
Mecanismo de pago y ventana temporal	El pago del seguro se procesa automáticamente: (1) el sistema de alerta temprana UPEC monitorea el ONI y el SPI-3 en tiempo real; (2) al superar el trigger durante 3 meses consecutivos, el sistema genera la orden de pago automáticamente; (3) el FCCG transfiere la compensación al ganadero asegurado en un máximo de 15 días hábiles post-activación del trigger, sin necesidad de peritaje en campo; (4) los pagos se realizan por transferencia bancaria o a través del sistema de pagos móviles del Banco del Estado (compatible con el 82% de los ganaderos del Tipo I con teléfono celular). Ventana temporal del pago: durante el episodio (no post-episodio), para que el ganadero pueda usar la compensación para financiar el protocolo de contingencia (compra de suplementos, fertilización de rescate) antes de que se materialice la mayor parte de la pérdida.	La ventana temporal del pago durante el episodio (no post-episodio) es la innovación más importante del diseño del seguro: los seguros agropecuarios convencionales pagan después de verificar el daño, lo que puede tardar 60–90 días post-cosecha. Para la ganadería del páramo del Carchi, el daño es acumulativo durante el episodio (la producción cae progresivamente desde el mes 1 hasta el mes 6–8 del El Niño fuerte); un pago en el mes 3 del episodio, cuando el ganadero todavía puede comprar suplementos y activar el protocolo de contingencia IA-4, mitiga el 45–55% de las pérdidas adicionales que se producirían sin intervención de contingencia. El pago post-episodio, en cambio, llega cuando el ganadero ya ha sufrido el descarte forzoso y no puede recuperar las vacas perdidas.
Mecanismo de incentivo de adopción del paquete de adaptación dentro del seguro	Descuento sobre la prima del 15% para los ganaderos del Tipo I que adoptan el Paquete Básico de Adaptación (IA-1, IA-2, IA-5 como mínimo) y pueden demostrarlo con el análisis de	El incentivo de adopción dentro del seguro es el instrumento de política que alinea los objetivos del programa de adaptación y del seguro: sin este incentivo, el seguro puede crear riesgo moral (el ganadero reduce su inversión en

Componente del Diseño del Seguro Climático Indexado	Especificación Técnica del Instrumento	Justificación basada en los hallazgos del libro y comparación con instrumentos existentes en Ecuador y la región andina
	suelo actualizado del LABONORT (evidencia de que el P disponible ≥ 12 mg/kg y el pH $\geq 5,6$). Incentivo adicional: los ganaderos que adoptan el Paquete Integral (incluyendo IA-4 reservas de forraje) reciben un trigger reducido para el Nivel 1 de la cobertura (ONI $\geq +0,8^{\circ}\text{C}$ en lugar de $+1,0^{\circ}\text{C}$) — el seguro se activa antes para los ganaderos mejor preparados porque sus pérdidas son menores y el pago temprano potencia el efecto de sus reservas de forraje pre-existentes.	adaptación porque el seguro cubre las pérdidas) y selección adversa (los ganaderos con menor adaptación de adaptación son más propensos a asegurarse). Con el incentivo, el seguro y el paquete de adaptación se refuerzan mutuamente: el ganadero que adopta el paquete paga menos de prima (incentivo financiero directo) y recibe mejor cobertura (trigger más temprano); el sistema de seguro tiene menores pérdidas esperadas porque los asegurados que adoptan el paquete tienen menor vulnerabilidad (lo que reduce el riesgo actuarial del fondo). Este diseño — seguro indexado + descuento por adaptación + pago durante el episodio — no tiene precedentes exactos en el Ecuador pero es coherente con los seguros ganaderos indexados implementados en Etiopía (IBLI, Index Based Livestock Insurance) y Mongolia (IBLIP), con las adaptaciones necesarias para el contexto del corredor del Carchi.

Nota. Elaboración propia.

13.4.2 El Pago Durante el Episodio: La Innovación Clave del Seguro

La clave de la innovación del SID no radica en el índice ni en los umbrales de activación, sino en el momento del pago. Aquí, el seguro se activa cuando el ganadero aún puede actuar, no después de que el daño ya esté hecho. Gracias al sistema de alerta temprana del proyecto, que logra detectar el problema entre 45 y 60 días antes de que el nivel de N mineral caiga por debajo del límite crítico (Cap. 6), el seguro comienza a pagar en el tercer mes del evento, justo cuando se ha superado el umbral durante tres meses consecutivos.

Esto significa que el ganadero recibe la compensación cuando todavía tiene la oportunidad de adquirir suplementos, realizar la fertilización de rescate y ajustar la carga de animales. La diferencia en la práctica es enorme: al recibir el pago en el tercer mes, puede evitar el descarte forzoso, que comúnmente ocurre entre los meses cuatro y seis.

Utilizando el dinero del seguro, puede financiar la suplementación necesaria para las vacas en riesgo. Por otro lado, si el pago se realiza después del episodio, como en el modelo convencional, el descarte ya ha sucedido y el dinero solo se puede usar para financiar la reposición, lo cual cuesta entre USD 1.200 y 1.400 por vaca, es decir, de 2.5 a 3 veces el valor de descarte.

En resumen, el seguro que paga durante el episodio no solo cubre las pérdidas pasadas, sino que también previene de manera activa parte de las pérdidas futuras.

"Si el seguro me paga cuando ya perdí las vacas, no me sirve de nada. Lo que necesito es que me llegue el dinero cuando todavía puedo salvar las vacas. Eso es lo que nunca ha habido." (Testimonio de ganadero del Tipo I, cantón Tulcán, taller de diseño participativo del SID, julio 2024).

13.5 Arquitectura Institucional del Programa de Adaptación

13.5.1 Los Cinco Actores y la División de Roles

El programa de adaptación que se propone, conocido como el Programa de Adaptación Climática Ganadera del Corredor del Carchi (PACCGC), necesita la colaboración de cinco actores clave, cada uno con un papel único y esencial: la UPEC, que aporta conocimiento técnico y sistemas de alerta; el MAG-Carchi, encargado del financiamiento público y de llevar a cabo la implementación a gran escala; el INIAP, que se centra en la investigación y en el desarrollo de germoplasma; FEDEGAN-Carchi, que organiza a los productores y funciona como canal de comunicación; y los GAD del corredor, que se encargan del cofinanciamiento y la conexión territorial.

Ninguno de estos actores puede ejecutar el programa de manera independiente. Por ejemplo, el sistema de alerta temprana más eficaz no alcanzará a los ganaderos del páramo sin la intervención de los extensionistas del MAG. Igualmente, los mejores extensionistas no tendrán recursos que ofrecer si no cuentan con el protocolo técnico proporcionado por la UPEC. Y, por último, un protocolo sólido no será adoptado si los ganaderos no están organizados para implementarlo.

Tabla 64.

Arquitectura Institucional del Programa de Adaptación Climática Ganadera del Corredor del Carchi (PACCGC): Cinco Actores, Roles, Capacidades Actuales y Fortalecimiento Institucional Necesario

Actor Institucional	Rol y Responsabilidades en el Programa de Adaptación	Capacidades Identificadas, Actuales, y Brechas Institucionales Necesario Fortalecimiento
Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC): institución académica líder del proyecto	(1) Operación del sistema de alerta temprana ENSO-ONI (mantenimiento del modelo de predicción, generación de alertas automáticas, actualización del protocolo de contingencia según nuevos datos); (2) capacitación técnica de los extensionistas del MAG-Carchi en el paquete de adaptación; (3) investigación adaptativa continua (ajuste de los umbrales del protocolo, nuevas variedades de pasturas, mejora del modelo de producción de leche); (4) coordinación académica con el INIAP para la producción de germoplasma y el banco de semillas.	Capacidades actuales: sistema de alerta ENSO-ONI operativo desde enero 2024; 3 investigadores especializados en suelos y producción bovina de alta altitud; laboratorio de suelos LABONORT con capacidad instalada de 2.400 análisis/año. Brechas: el sistema de alerta requiere 1 técnico de datos a tiempo completo (presupuesto UPEC actual: disponible solo 0,5 ETP); la investigación adaptativa continua requiere acceso sostenido a las 80 UPAs sentinela (actualmente sin convenio de continuidad más allá del proyecto). Fortalecimiento necesario: convenio UPEC-MAG-Carchi para el financiamiento del técnico de datos y el mantenimiento del sistema de alerta (propuesta de presupuesto: USD 28.000/año).
Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG-Carchi): institución gubernamental de implementación	(1) Provisión de los 4 extensionistas especializados en páramo financiados por el programa (USD 31.600/año; 1 extensionista por cantón ganadero del corredor: Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira); (2) administración del subsidio diferenciado al Paquete Básico de Adaptación (IA-1: 30%, IA-2: 30%, IA-5: 100%, IA-3: 20%); (3) co-administración del FCCG (Fondo de Compensación Climática Ganadero del Carchi) junto con la Federación de Ganaderos del Carchi y la UPEC; (4) articulación con el MAGAP central para el financiamiento del Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible 2023–2030.	Capacidades actuales: 12 extensionistas agropecuarios activos en el corredor del Carchi (2024), de los cuales ninguno está especializado en ganadería de páramo (todos son generalistas); presupuesto de asistencia técnica: USD 320.000/año (de los cuales USD 120.000 se destinan a la ganadería de la provincia). Brechas principales: falta de especialización técnica en ganadería de páramo; falta de instrumentos de subsidio de insumos (actualmente el MAG-Carchi distribuye subsidios solo en emergencias declaradas, no de manera preventiva); falta de mecanismo de co-gestión con la UPEC para el sistema de alerta. Fortalecimiento necesario: 4 extensionistas especializados en ganadería de páramo (capacitación de 80 horas en el paquete de adaptación UPEC); instrumento de subsidio preventivo a insumos (convenio con almacenes agropecuarios del Carchi para canalizar el subsidio a través del sistema de certificados de insumo).
INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias): instituto de investigación agropecuaria	(1) Producción y distribución de germoplasma mejorado para IA-6 (dosis seminales de toros probados en el páramo del Carchi; capacidad: 8.000 dosis/año); (2) operación del banco comunitario de semillas de pasturas mixtas	Capacidades actuales: Estación Experimental Santa Catalina (Pichincha) y Estación Experimental Tropical Pichilingue (Los Ríos); el Carchi no tiene Estación Experimental propia del INIAP, lo que limita la investigación adaptativa local. Brechas: la producción de semilla de

Actor Institucional	Rol y Responsabilidades en el Programa de Adaptación	Capacidades Identificadas, Actuales, y Brechas Institucionales Necesario Fortalecimiento
	para IA-3 (producción de semilla de <i>Lolium perenne</i>, <i>Poa pratensis</i> y <i>Trifolium repens</i> adaptadas al páramo del Carchi a precio subsidiado; objetivo: 80% de la semilla requerida para el programa producida localmente al año 5); (3) investigación de nuevas variedades de pasturas termotolerantes y resistentes a la sequía para el escenario RCP 8.5 al 2030–2040.	pasturas adaptadas al páramo del Carchi requiere un campo semillero a 3.200–3.600 msnm que actualmente no existe en el sistema INIAP para la provincia; la ausencia de una estación experimental en el Carchi es la mayor brecha institucional del sistema de investigación agropecuaria para el corredor. Fortalecimiento necesario: convenio INIAP-UPEC para el establecimiento de una unidad de investigación adaptativa en ganadería de páramo del Carchi (campus UPEC Tulcán como sede; USD 120.000 de inversión inicial + USD 45.000/año de operación).
Federación de Ganaderos del Carchi (FEDEGAN-Carchi) y organizaciones de productores: representación gremial y canal de difusión	(1) Representación de los ganaderos en el directorio del FCCG (Fondo de Compensación Climática Ganadero del Carchi); (2) organización de los grupos de extensión por cantón (grupos de 15–20 ganaderos del mismo tipo de sistema para la asistencia técnica grupal del extensionista del MAG-Carchi); (3) gestión del banco comunitario de semillas a nivel cantonal (distribución de semillas IA-3 a los ganaderos del grupo, recolección del pago en especie — devolución de semilla producida en el siguiente ciclo); (4) difusión del sistema de alertas temprana a los ganaderos no conectados digitalmente (el 18% del Tipo I no tiene teléfono inteligente).	Capacidades actuales: FEDEGAN-Carchi tiene 1.240 ganaderos afiliados (64% del total del corredor); 4 organizaciones de productores activas por cantón (COCUMELAC, ASOPG Bolívar, AGOPEG Espejo, ASOGAM Mira). La cobertura del 36% de ganaderos no afiliados —concentrada en el segmento de menor escala del Tipo I— es la principal brecha de alcance del programa. Fortalecimiento necesario: vinculación de los ganaderos no afiliados al programa a través del incentivo del subsidio del paquete (la suscripción al programa implica la afiliación a FEDEGAN-Carchi o a una de sus organizaciones miembro, reduciendo la brecha de cobertura del 36% al 10–12% estimado al año 3 del programa).
Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) provincial y cantonales del Carchi: gobiernos locales con competencias agropecuarias	(1) Aportar el 0,8% del impuesto predial de los 4 cantones del corredor ganadero al FCCG (USD 280.000/año estimados); (2) co-financiar el PSE (Pago por Servicios Ecosistémicos) para los ganaderos del Tipo I que mantengan la carga animal por debajo del umbral de degradación del páramo (< 1,2 UBAs/ha); (3) incorporar el mapa de riesgo climático ganadero del corredor (producto del proyecto UPEC) en los Planes de Desarrollo y	Capacidades actuales: el GAD Provincial del Carchi tiene una Dirección de Gestión de Riesgos con 3 técnicos; los GAD cantonales de Tulcán, Bolívar, Espejo y Mira tienen Juntas Parroquiales con acceso a fondos de inversión productiva del 15% de sus presupuestos. El aporte de los GAD al FCCG requiere reforma del reglamento de uso del impuesto predial en 2 de los 4 cantones (Espejo y Mira, donde el uso del impuesto predial para fondos sectoriales no está actualmente habilitado). Fortalecimiento necesario: apoyo técnico de la UPEC para la incorporación del mapa de

Actor Institucional	Rol y Responsabilidades en el Programa de Adaptación	Capacidades Identificadas	Actuales, y Necesario	Brechas Fortalecimiento
	Ordenamiento Territorial (PDOT) de los 4 cantones para la planificación del uso del suelo del páramo.	riesgo climático ganadero en los PDOT; taller de socialización con los 4 alcaldes del corredor para el acuerdo político del aporte al FCCG.		

Nota. Elaboración propia.

13.6 Hoja de Ruta de Implementación: Del Laboratorio al Campo al 2035

Tabla 65.

Hoja de Ruta de Implementación del PACCGC en Cuatro Fases (2025–2035): Acciones Prioritarias, Indicadores de Logro y Presupuesto por Fuente de Financiamiento

Fase y Horizonte Temporal	Acciones Prioritarias (en orden de prioridad dentro de la fase)	Indicadores de Logro (metas medibles al final de la fase)	Presupuesto Estimado y Fuentes de Financiamiento
FASE 0: Preparación institucional (2025; 12 meses)	(1) Firma del convenio MAG-Carchi/UPEC/INIAP/FEDEGAN-Carchi para la ejecución del Programa de Adaptación Climática Ganadera del Corredor del Carchi (PACCGC); (2) contratación de los 4 extensionistas especializados en páramo y capacitación de 80 horas en el paquete de adaptación UPEC; (3) diseño legal y actuarial del FCCG con apoyo de la Superintendencia de Bancos del Ecuador y el MAG; (4) primera campaña de análisis de suelos gratuitos para las 620 fincas del Tipo I con apoyo del LABONORT-UPEC (año 0 del monitoreo edáfico); (5) establecimiento del banco comunitario de semillas en los 4 cantones del corredor (campo semillero UPEC + INIAP Santa Catalina).	(1) Convenio firmado y operativo; (2) 4 extensionistas contratados y capacitados; (3) reglamento del FCCG aprobado por el Directorio provisional; (4) 620 análisis de suelo realizados y digitalizados en la base de datos del sistema de alerta; (5) banco de semillas con reserva inicial de 200 kg de mezcla de pasturas mixtas producida localmente.	Presupuesto Fase 0: USD 186.000 (análisis de suelos: USD 26.040; extensionistas (3 meses): USD 7.900; banco de semillas: USD 18.400; diseño legal FCCG: USD 24.000; capacitación técnica: USD 12.600; otros: USD 97.060). Fuentes: Proyecto UPEC (USD 38.000) + MAG-Carchi (USD 68.000) + INIAP (USD 24.000) + GAD Provincial del Carchi (USD 56.000).
FASE 1: Implementación inicial del Paquete Básico (2026–2027; 24 meses)	(1) Encalado y fertilización fosfatada correctiva para el primer bloque de 186 fincas del Tipo I (30% del total; criterio de selección: las más degradadas según el análisis de suelo de la Fase 0 con $\text{pH} < 5,0$ y $\text{P} < 5 \text{ mg/kg}$); (2) lanzamiento del	(1) 186 fincas Tipo I con encalado y fertilización fosfatada aplicados; pH medio del bloque $\geq 5,6$ al final de la Fase 1; P	Presupuesto Fase 1: USD 846.000/año (subsidio IA-1 bloque 1: USD 127.200; subsidio IA-2 bloque 1: USD 67.200; operaciones extensionistas: USD

Fase y Horizonte Temporal	Acciones Prioritarias (en orden de prioridad dentro de la fase)	Indicadores de Logro (metas medibles al final de la fase)	Presupuesto Estimado y Fuentes de Financiamiento
	seguro climático indexado (SID) con la primera temporada de afiliación: meta 400 asegurados en el corredor (todos los tipos); (3) primera renovación gradual de pasturas mixtas (IA-3) en las 186 fincas del primer bloque (0,6 ha/finca/año); (4) activación del sistema de monitoreo de CC para todas las vacas de las 80 UPAs sentinela del proyecto como modelo para la capacitación del segundo bloque.	disponible medio $\geq$ 14 mg/kg; (2) 400 ganaderos del corredor asegurados en el SID; fondo de reserva del FCCG: USD 240.000; (3) 111,6 ha de pasturas mixtas establecidas en las 186 fincas; (4) sistema de monitoreo de CC funcionando en las 80 UPAs sentinela con datos actualizados cada 30 días.	31.600/año; operación sistema de alerta: USD 36.400; banco de semillas: USD 24.000; administración FCCG: USD 18.000; capacitación ganaderos: USD 28.000; otros: USD 113.600). Fuentes: MAG-Carchi (USD 292.000) + MAGAP-Plan Ganadería Lechera (USD 380.000) + GAD Carchi (USD 174.000).
FASE 2: Escalamiento a escala del corredor (2028–2030; 36 meses)	(1) Extensión del encalado y fertilización fosfatada correctiva al 100% de las 620 fincas del Tipo I del corredor (bloques 2 y 3: 434 fincas adicionales); (2) inicio del programa de inseminación artificial con germoplasma mejorado IA-6 para las 186 fincas del primer bloque (que ya tienen 2 años de mejora edáfica y forrajera que soportan el potencial genético adicional); (3) lanzamiento del PSE Socio Páramo para los ganaderos del Tipo I con carga animal $\leq$ 1,2 UBAs/ha (meta: 220 ganaderos del Tipo I calificados y recibiendo el pago del PSE de USD 392–588/finca/año al final de la Fase 2); (4) primera evaluación de impacto del programa (UPEC, año 3 post-inicio): comparación de indicadores de suelo, PPNA, producción de leche y margen neto entre el grupo de adopción temprana y el grupo de control.	(1) 620 fincas Tipo I con encalado correctivo completado; pH medio del corredor $\geq$ 5,7; P disponible medio $\geq$ 16 mg/kg; (2) 186 fincas con programa de IA iniciado; tasa de concepción al primer servicio $\geq$ 48% (vs. 38% basal) en el grupo IA; (3) 220 ganaderos del Tipo I recibiendo PSE Socio Páramo; carga animal media del Tipo I: $\leq$ 1,1 UBAs/ha; (4) evaluación de impacto completada con resultados publicados; margen neto del bloque de adopción temprana	Presupuesto Fase 2: USD 1.240.000/año (escala completa del Paquete Básico para 620 fincas del Tipo I + inicio IA-6 para primer bloque + operación PSE). Fuentes: MAG-Carchi (USD 164.000 programa base) + MAGAP (USD 480.000) + GAD Carchi (USD 280.000) + PSE MAATE (USD 220.000) + Fondo Adaptación UNFCCC (USD 96.000, si aplica la solicitud presentada en 2025).

Fase y Horizonte Temporal	Acciones Prioritarias (en orden de prioridad dentro de la fase)	Indicadores de Logro (metas medibles al final de la fase)	Presupuesto Estimado y Fuentes de Financiamiento
		$\geq$ USD 5.200/finca/año (vs. USD 3.870 basal).	
FASE 3: Consolidación y autosostenibilidad (2031–2035; 60 meses)	(1) Extensión del programa de inseminación artificial al 60% de las fincas del Tipo I (372 fincas) con segunda generación genética en el primer bloque; (2) operación autosostenible del FCCG: el fondo debe ser actuarialmente viable sin transferencias adicionales del MAGAP al año 5 de la Fase 3 (año 10 del programa), con las primas anuales de los asegurados y el aporte estable de los GAD; (3) transferencia del liderazgo operativo del programa de la UPEC a FEDEGAN-Carchi (la UPEC pasa a rol de soporte técnico e investigación); (4) publicación del modelo de gestión del PACCGC como caso replicable para otros corredores ganaderos del páramo del Ecuador (Imbabura, Pichincha, Tungurahua) con la facilitación del INIAP y el MAGAP.	(1) 372 fincas del Tipo I con programa IA activo; producción media del Tipo I $\geq$ 8,4 L/vaca/día (objetivo del Escenario Tendencial al 2035; Cap. 11); (2) FCCG autosostenible con reservas $\geq 1,5 \times$ la pérdida esperada de un El Niño moderado; ratio combinado del FCCG $\leq 85\%$ (costo siniestros + gastos operativos / primas recaudadas); (3) FEDEGAN-Carchi como operador principal del PACCGC; UPEC en rol de soporte técnico y monitoreo; (4) modelo del PACCGC documentado y socializado en 3 provincias adicionales de la sierra norte del Ecuador.	Presupuesto Fase 3 (régimen autosostenible): USD 640.000/año (vs. USD 1.240.000/año en la Fase 2; la reducción refleja el fin de los subsidios de encalado y fertilización correctiva —que ya se completaron en todas las fincas al inicio de la Fase 2— y la mayor parte del financiamiento cubierto por las primas del SID y el PSE). Fuentes: primas SID (USD 180.000) + PSE MAATE (USD 220.000) + MAG-Carchi (USD 120.000) + GAD Carchi (USD 120.000).

Nota. Elaboración propia.

13.6.1 La Ventana Crítica 2025–2028 y el Riesgo del Timing

El plan de cuatro fases establece un periodo crítico entre 2025 y 2028, el cual determinará si el programa puede implementarse a tiempo para evitar que el Tipo I alcance su punto de inflexión

de inviabilidad. Según el Cap. 11, este punto crítico se proyecta para el intervalo de 2038 a 2041 en un escenario conservador (RCP 4.5 sin adaptación) y entre 2028 y 2035 si la frecuencia de eventos de El Niño fuerte aumenta al 50%.

Es importante considerar que los efectos del encalado y de la fertilización fosfatada correctiva (IA-1 e IA-2) tardan entre 2 y 3 años en manifestarse completamente en la productividad de los pastizales. Por otro lado, los impactos del mejoramiento genético (IA-6) requieren de 4 a 6 años para reflejarse en la producción de leche. Por lo tanto, un programa que inicia en 2025 generaría sus efectos completos sobre el Tipo I entre 2027 y 2031, justo en el periodo crítico de 2028 a 2035, donde el riesgo de inviabilidad es más alto en el escenario acelerado.

Cada año que se retrasa el inicio de la Fase 0 desplaza hacia adelante los resultados del programa y acorta la ventana de anticipación al punto de inflexión. Si el programa comienza en 2027 en lugar de 2025, los resultados completos se verían entre 2029 y 2033, momento en el cual algunos ganaderos del Tipo I ya habrán abandonado la actividad en el escenario acelerado. Esto disminuiría el número crítico de asegurados del FCCG y la viabilidad económica del banco de semillas.

La urgencia de iniciar el programa es, en sí misma, una cuestión económica. El Cap. 11 revela que cada año adicional de retraso en la adaptación incrementa el valor actual neto de las pérdidas acumuladas en aproximadamente USD 2,400 por finca del Tipo I, considerando una tasa de descuento del 8%. Es un hecho que los ganaderos no están organizados para adaptarse a esta situación.

13.7 El Mecanismo PSE Socio Páramo: Articulando la Adaptación con la Conservación

13.7.1 El Diseño del PSE para el Corredor del Carchi

El mecanismo de Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) Socio Páramo que se presenta en este capítulo, y que se mencionó previamente en el Cap. 12, es la herramienta que completa el triángulo de financiamiento para la adaptación del Tipo I. Este Paquete Básico tiene un costo de USD 820 por finca al año; de este monto, el subsidio público del programa cubre USD 392 por finca al año, lo que representa el 48% del costo total. Por tanto, el ganadero debe hacerse cargo de los restantes USD 428 por finca al año.

El PSE Socio Páramo establece una tarifa entre USD 392 y USD 588 por finca al año para aquellos ganaderos que mantienen una carga animal de $\leq 1,2$ UBAs/ha. Esto significa que el programa puede financiar entre el 92% y el 137% de la contribución del ganadero, lo que implica que para un ganadero del Tipo I que implementa prácticas de manejo sostenible del páramo, la adaptación climática podría resultar prácticamente gratuita.

La tarifa del PSE Socio Páramo se ha ajustado de acuerdo con el valor de los servicios hídricos que ofrece el páramo a los sistemas de agua potable de Tulcán, que tiene 126,000 habitantes, e Ibarra, con 181,000 habitantes, los cuales obtienen su agua de las cuencas del páramo del Carchi. Según SENAGUA (2021), el valor de los servicios hídricos de la cuenca del río Mira, que incluye parte del corredor ganadero del Carchi, se estimó entre USD 1.4 y USD 2.8 millones al año para los sistemas de agua potable de las ciudades que se encuentran río abajo.

Si se distribuye este valor entre las 1,638 hectáreas de páramo ganadero activo del Tipo I que el programa de adaptación busca conservar (en contraste con lo que ocurriría si no se implementa ninguna adaptación), el valor por hectárea de la conservación se sitúa entre USD 854 y USD 1,709 al año. Esto supera ampliamente la tarifa PSE propuesta, que va de USD 28 a USD 42 por hectárea al año, lo que sugiere que esta tarifa es bastante conservadora y que hay margen para aumentos a medida que el mecanismo se afiance.

El triángulo de financiamiento de la adaptación del Tipo I del corredor del Carchi

Vértice 1 — El ganadero: invierte aproximadamente USD 828 por finca al año en el Paquete Básico. A cambio, recibe un BCR de 5.8, lo que significa un retorno privado sobre su inversión, además de un Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) que oscila entre USD 392 y USD 588 anuales por finca. Esto cubre entre el 47% y el 71% de su inversión inicial, resultando en un costo neto efectivo que varía entre USD 240 y USD 436 por finca al año.

Vértice 2 — El Estado (MAG-Carchi + MAGAP + GAD): este invierte USD 392 por finca al año en subsidios para el Paquete Básico. También financia un sistema de alerta temprana y co-financia el PSE, obteniendo un BCR público de 19.4 veces, gracias a la reducción de la EAL, menos necesidad de asistencia de emergencia y el valor de la información de monitoreo.

Vértice 3 — Los usuarios del agua aguas abajo (ciudades de Tulcán e Ibarra): estos pagan tarifas del PSE a través de los sistemas de agua potable, que van de USD 0.12 a USD 0.18 por metro cúbico adicional a la tarifa actual. Esto genera ingresos anuales que oscilan entre USD 840,000 y USD 1,260,000, lo cual es suficiente para cubrir el PSE del total del Tipo I del corredor. A cambio, reciben el servicio de regulación hídrica que proporciona el páramo ganadero conservado.

Este triángulo funciona porque cada uno de los tres vértices tiene intereses complementarios que no pueden satisfacer de manera individual. El ganadero no puede asumir el costo total del paquete por sí solo. El Estado no puede recuperar el valor ecosistémico del páramo sin que el ganadero lo cuide. Y, por último, los usuarios del agua no pueden garantizar la conservación del páramo sin pagar por el servicio que reciben. El PSE Socio Páramo es el mecanismo que une estos tres vértices en un equilibrio estable.

13.8 Síntesis del capítulo

- **Protocolo de manejo del suelo (Tabla 61):** se presentan seis prácticas clave: (1) encalado correctivo con cal dolomítica, aplicando entre 2.0 y 2.4 toneladas por hectárea en el primer año, y un mantenimiento de 0.8 a 1.2 toneladas cada tres años. El objetivo es alcanzar un pH de entre 5.8 y 6.2; notablemente, solo el 14% del Tipo I ha recibido encalado. (2) Fertilización fosfatada correctiva utilizando RP o SPT, con una dosis de 180 a 240 kg de P_2O_5 por hectárea en el primer año, 30 días después del encalado, y un mantenimiento de 60 a 80 kg por año. Se busca mantener el fósforo en niveles iguales o superiores a 20 mg/kg, ya que este elemento es la principal limitante para la mineralización del nitrógeno. (3) Fertilización de mantenimiento con K y Mg, aplicando entre 60 y 80 kg de K_2O más 20 a 30 kg de MgO por año. Durante eventos de La Niña, se recomienda duplicar la dosis de potasio para contrarrestar la lixiviación. (4) Análisis de suelo anual que considera 8 parámetros de LABONORT; el muestreo se realiza entre agosto y septiembre, y los resultados deben estar listos antes del 15 de octubre. Se espera alcanzar una adopción que varía entre el 3% y el 80% al quinto año del programa. (5) Protocolo de contingencia para El Niño, que se activa cuando el índice ONI es mayor o igual a $+0.5^{\circ}C$ durante 2 meses. Este protocolo incluye la compra anticipada de forraje y fertilización nitrogenada de rescate, aplicando entre 80 y 100 kg de urea por hectárea, lo que ayuda a reducir el impacto en la producción del 51% a tan solo 28%. (6) Protocolo de contingencia para La Niña, que

se activa cuando el ONI es menor o igual a -0.5°C durante 2 meses. Se recomienda la fertilización potásica preventiva, así como la rotación de potreros con un mayor periodo de descanso y un diagnóstico de compactación tras el episodio

- **El protocolo para el manejo del hato (Tabla 62)** incluye cuatro prácticas clave:
- Se implementa un sistema de pastoreo rotacional con medición de biomasa cada 14 días. El umbral de entrada debe ser de al menos 2.200 kg de materia seca por hectárea, mientras que el de salida no debe superar los 800 kg de materia seca residual. El periodo de descanso varía entre 35 a 90 días, dependiendo de la temporada y el evento en particular. Para llevar a cabo esto, es necesario dividir el pastizal en al menos cuatro potreros utilizando cercas eléctricas. (2) Se realiza un monitoreo del estado corporal (CC) utilizando la escala Edmonson del 1 al 5 cada 30 días en todas las vacas en ordeño. Si el CC es menor a 2,5 al momento del parto, se inicia una suplementación energética. Si el CC cae por debajo de 2,0 en cualquier momento, se activa un protocolo de recuperación intensiva. Se espera que estas medidas reduzcan el intervalo entre partos (IEP) de 428 a menos de 390 días, lo que podría significar un ingreso adicional de 992 dólares por finca al año, sin costos extras en insumos. (3) La suplementación estratégica es diferenciada. Se utiliza un mineral permanente que contiene una mezcla con alto contenido de fósforo (6-8%). En situaciones de contingencia como La Niña, se ofrece harina de soya desgrasada (150-200 g/vaca/día) cuando el porcentaje de proteína cruda es inferior al 14%. Para casos de El Niño, se suministra maíz molido (500-800 g/vaca/día) cuando la producción potencial neta anual (PPNA) es menor a 1.800 kg de materia seca por hectárea al año proyectado. (4) Finalmente, se aplica un manejo reproductivo de precisión. La detección del celo se realiza dos veces al día durante 30 minutos. La primera inseminación artificial (IA) después del parto debe llevarse a cabo tras al menos 60 días. La meta es alcanzar una tasa de concepción del primer servicio de al menos 55%, en comparación con un 38% que se considera basal.
- **Seguro climático indexado dual (Tabla 63):** se utiliza el índice de dos variables: ONI (El Niño) y SPI-3 local (La Niña). Este sistema cuenta con tres niveles de activación. En el Nivel 1, cuando el ONI es igual o superior a $+1,0^{\circ}\text{C}$ o el SPI-3 es igual o inferior a $-0,8$ durante tres meses, se activa una compensación del 30% de la pérdida esperada, que equivale a USD 1.746 por finca Tipo I en el caso de un El Niño moderado. En el Nivel 2, con un ONI de $+1,5^{\circ}\text{C}$ o un SPI-3 de $-1,2$, la compensación se eleva al 65%, lo que se traduce en USD 3.796 por finca para un El Niño fuerte. Para el Nivel 3, si el ONI alcanza

+2,0°C, la compensación aumenta al 85%. La prima, que se considera actuarialmente neutra, oscila entre USD 86 y 124 por finca al año para el Tipo I. Con un subsidio público del 50%, esto se reduce a un rango de USD 43 a 62 por finca al año, lo cual es accesible para el Tipo I. El mecanismo de pago es automático y se efectúa durante el episodio, es decir, en los tres meses posteriores al activador, sin necesidad de peritaje, y se realiza mediante transferencia o pago móvil en un plazo máximo de 15 días hábiles. Además, hay un incentivo para fomentar la adopción: un descuento del 15% sobre la prima para los ganaderos que cuenten con el Paquete Básico certificado (con $P \geq 12$ mg/kg y $pH \geq 5,6$ en el análisis LABONORT) y un activador reducido ($ONI \geq +0,8^{\circ}C$) para los ganaderos que tengan reservas de forraje IA-4. La administración del sistema está a cargo de FCCG, gestionado conjuntamente por MAG-Carchi, FEDEGAN-Carchi y UPEC.

- En cuanto a la **arquitectura institucional (Tabla 64)**, se identifican cinco actores clave. Primero, la UPEC, que se encarga de operar el sistema de alerta, capacitar a los extensionistas y llevar a cabo investigación adaptativa. Sin embargo, enfrenta una brecha en términos de ETP técnico de datos, con un déficit de 0.5 y un costo de USD 28,000 anuales. En segundo lugar, está el MAG-Carchi, que cuenta con cuatro extensionistas enfocados en el páramo, además de gestionar un subsidio diferenciado y cogestionar la FCCG. A pesar de esto, presenta una falta de especialización en el manejo del páramo y no cuenta con un mecanismo de subsidio preventivo. Luego tenemos a INIAP, que ofrece 8,000 dosis de germoplasma mejorado al año y opera un banco de semillas. No obstante, la brecha crítica aquí es la ausencia de un campo semillero a altitudes de 3,200 a 3,600 msnm en el Carchi. Se ha establecido un convenio entre INIAP y UPEC para crear una unidad adaptativa en el campus de UPEC en Tulcán, que requiere una inversión de USD 120,000 y un mantenimiento de USD 45,000 anuales. FEDEGAN-Carchi también juega un rol importante, funcionando un directorio de la FCCG y formando grupos de extensión en distintos cantones, así como un banco comunitario de semillas. Sin embargo, un 36% de los ganaderos no están afiliados, y esta cifra está más concentrada en las explotaciones de Tipo I más pequeñas. Por último, el GAD del corredor, que establece un impuesto predial del 0.8% al FCCG, lo que suma unos USD 280,000 al año. También participa en el PSE Socio Páramo e incorpora un mapa de riesgo en el PDOT.

- **Hoja de ruta (Tabla 65):** En la Fase 0 (2025), se firmará el convenio PACCGC, se capacitarán a 4 extensionistas, se realizarán 620 análisis de suelo gratuitos y se establecerá un banco de semillas con 200 kg de mezcla; el presupuesto asignado es de USD 186.000. En la Fase 1 (2026–2027), se llevará a cabo un encalado y fertilización correctiva en 186 fincas Tipo I, que representa el 30% del total. Además, se lanzará el SID con 400 asegurados y se desarrollarán 111,6 hectáreas de pasturas mixtas; el presupuesto será de USD 846.000 por año. Durante la Fase 2 (2028–2030), la meta es extender los programas al 100% de las 620 fincas Tipo I. También se iniciará el IA-6 para el primer bloque y se implementará el PSE Socio Páramo para 220 ganaderos, con un presupuesto de USD 1.240.000 al año. Finalmente, en la Fase 3 (2031–2035), se aplicará el IA-6 al 60% de las fincas Tipo I. Se buscará que el FCCG sea autosostenible y se realizará la transferencia del liderazgo a FEDEGAN-Carchi. Además, se documentará un modelo PACCGC para su replicación, con un presupuesto autosostenible de USD 640.000 al año. La meta para 2035 incluye lograr un margen neto para las fincas Tipo I de al menos USD 5.200 al año, un PPNA de al menos 3.000 kg MS por hectárea cada año, una producción de al menos 7,7 litros por vaca al día y que el FCCG cuente con reservas que sean al menos 1,5 veces la pérdida esperada por un evento de El Niño moderado.
- **PSE Socio Páramo (triángulo de financiamiento):** donde la tarifa oscila entre USD 28 y USD 42 por hectárea al año. Para una finca de 14 hectáreas, esto significa un costo anual de entre USD 392 y USD 588, que representa entre el 47% y el 71% del costo del Paquete Básico. En cuanto al valor de los servicios hídricos en la cuenca del río Mira, según SENAGUA (2021), se estima que alcanza entre USD 1,4 y USD 2,8 millones al año, lo que sugiere que la tarifa del PSE es bastante conservadora. En el triángulo de financiamiento, el ganadero invierte USD 828 al año y obtiene un beneficio de costo de retorno (BCR) de 5,8, sumado al PSE, resultando en un costo neto que varía entre USD 240 y USD 436 al año. Por otro lado, el Estado aporta USD 392 anuales en subsidios y recibe un BCR público de 19,4 veces esa inversión. Los usuarios del agua en Tulcán-Ibarra también juegan un papel, ya que pagan la tarifa del PSE a cambio de la regulación hídrica proporcionada por el páramo que se conserva. Un argumento urgente para la implementación del proyecto se centra en la ventana crítica que va de 2025 a 2028. Cada año que pasa sin acción incrementa el valor actual neto (VAN) de las pérdidas del Tipo I, alcanzando USD 2.400 por finca.

CAPÍTULO 14

Políticas Públicas e Instrumentos de Gestión del Riesgo Climático

Marco normativo vigente con cinco brechas de implementación, paquete de cinco instrumentos de política (SDIA, CAC, NCMPF, OPCAM, SPIAP), gobernanza multinivel en cuatro niveles, cuatro reformas normativas prioritarias y seis indicadores de M&E con metas al 2030 y 2035



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- **Evaluar** el marco normativo vigente en el Ecuador —Constitución, COA, LORSA, PND 2021–2025 y PDOT-GPC— en relación con las propuestas del Capítulo 13, identificando las brechas de implementación y las oportunidades de apalancamiento normativo para el PACCGC.
- **Describir** el paquete de cinco instrumentos de política: el Subsidio Diferenciado a Insumos de Adaptación (SDIA, USD 114.000/año para IA-1 e IA-2), el Crédito de Adaptación Climática (CAC, hasta USD 2.400/finca al 5,5% con 18 meses de gracia), la Norma de Contenido Mínimo Proteico del Forraje (NCMPF, umbral 14% PC con premio de USD 0,04/kg MS para $PC \geq 17\%$), la Ordenanza Provincial de Carga Animal

Máxima en el Páramo (OPCAM, umbral 1,2 UBAs/ha vinculado al PSE) y el Sistema Provincial de Información Agropecuaria del Páramo (SPIAP, USD 42.000/año de operación).

- **Aplicar** el marco de gobernanza multinivel en cuatro niveles: finca (Nivel 1), corredor ganadero del Carchi (Nivel 2), provincial/nacional (Nivel 3) e internacional (Nivel 4), identificando los instrumentos de articulación, los actores y los flujos de información entre niveles.
- **Priorizar** el paquete de cuatro reformas normativas necesarias para la implementación del PACCGC: RF-1 (habilitación legal del PSE Socio Páramo, urgencia crítica, 2025), RF-2 (reglamento operativo del SID, urgencia alta, 2026), RF-3 (ZPAE en el Plan Nacional Ganadería Lechera Sostenible 2026–2030, urgencia alta, 2025) y RF-4 (OPCAM del GAD Provincial del Carchi, urgencia media, 2026).
- **Monitorear** el impacto del PACCGC usando los seis indicadores del marco de M&E: pH medio del suelo, P disponible, PPNA, producción de leche del Tipo I, margen neto del Tipo I e Índice de Persistencia Ganadera del Páramo (IPGP), con sus líneas de base 2024 y metas al 2030 y 2035.

14.1 Introducción: La Política como Condición de Escala

El Capítulo 13 mostró que el paquete de adaptación técnica puede funcionar a nivel de finca: aprender el protocolo de manejo del suelo toma solo 4 horas, se puede contratar el seguro con una cédula de identidad, y la hoja de ruta presenta presupuestos detallados.

Sin embargo, hay una condición de escala que no puede ser resuelta a nivel de finca: el banco de semillas de pasturas mixtas necesita una demanda mínima de 1.000 kg/año para ser económicamente viable. Si se produce menos, el costo por kg supera el precio de importar semillas desde Colombia o Argentina.

Además, el FCCG requiere al menos 400 asegurados para ser viable desde el punto de vista actuarial, y el PSE Socio Páramo necesita la aprobación de la OPCAM por parte del GAD Provincial. Por otro lado, para que la línea CAC de BanEcuador funcione, el MAGAP debe establecer el fondo de garantía parcial. Ninguna de estas condiciones puede cumplirse con iniciativas individuales de los ganaderos, sin importar cuán bien diseñado esté el paquete técnico. Se necesita intervención de políticas públicas: instrumentos legales, financiamiento

estatal, instituciones que trabajen en conjunto y reglas que creen incentivos adecuados para todos los involucrados en el corredor.

El Capítulo 14, por lo tanto, se centra en la escala: examina las condiciones normativas, los instrumentos de política y el marco de gobernanza necesarios para que el paquete técnico del Cap. 13 llegue a las 620 fincas del Tipo I en el corredor, no solo a las 80 UPAs sentinela del proyecto.

Este capítulo opera en tres niveles al mismo tiempo: el nivel diagnóstico, que mapea el marco normativo actual e identifica sus fallas; el nivel propositivo, que diseña los instrumentos de política y las reformas necesarias; y el nivel evaluativo, que establece los indicadores y metas que permiten evaluar si el programa está logrando los resultados deseados.

Estos tres niveles son interdependientes: una política sin un diagnóstico normativo preciso se basa en suposiciones erróneas; una política sin herramientas concretas no puede ser llevada a cabo; y una política sin indicadores no puede ser evaluada ni mejorada.

14.2 Marco Normativo Vigente: Oportunidades y Brechas

14.2.1 La Arquitectura Legal ya Está Construida — El Problema es la Implementación.

El hallazgo más impactante del análisis normativo del corredor ganadero del Carchi es realmente sorprendente: Ecuador cuenta con todas las normas necesarias para poner en marcha el PACCGC.

La Constitución de 2008 exige al Estado que conserve el suelo (Art. 409), que asegure la soberanía alimentaria (Art. 281) y que implemente medidas para adaptarse al cambio climático (Art. 414). Además, el COA permite la creación del PSE (Art. 194). Por otro lado, la LORSA manda al Estado a establecer seguros para los pequeños productores (Art. 22).

El PND 2021–2025 también establece una meta clara para mejorar la productividad ganadera en la sierra norte (Meta 6.3). La verdadera cuestión no radica en la falta de normas, sino en la desconexión entre lo que está escrito y su implementación en la práctica.

Tabla 66.

*Marco Normativo Vigente Relevante para la Ganadería del Páramo del Carchi:
Disposiciones, Brechas de Implementación y Recomendaciones de Reforma*

Instrumento Normativo Vigente	Disposición Relevante para la Ganadería del Páramo del Carchi	Brecha de Implementación, Alineación con las Propuestas del Cap. 13 y Recomendación de Reforma
Constitución del Ecuador 2008: Art. 281 (soberanía alimentaria), Art. 409 (conservación del suelo), Art. 414 (adaptación al cambio climático), Art. 57 num. 8 (derechos de la naturaleza)	Art. 281: el Estado garantizará la soberanía alimentaria a través del fomento de la producción agropecuaria familiar. Art. 409: la conservación del suelo es una obligación del Estado y los ciudadanos; se prohíbe la degradación del suelo. Art. 414: el Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, limitando las emisiones de gases de efecto invernadero, y tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación.	La Constitución provee la base normativa máxima para el PACCGC: el Art. 281 obliga al Estado a fomentar la producción familiar — categoría en la que se ubica el 94% de las fincas del Tipo I del corredor. El Art. 409 prohíbe la degradación del suelo, lo que implica una obligación constitucional de intervenir en los suelos ácidos y con P deficiente que afectan al 78% de las UPAs del Tipo I (Cap. 5). El Art. 414 obliga al Estado a adoptar medidas de adaptación al cambio climático, lo que constituye el fundamento jurídico de más alto rango para el financiamiento público del PACCGC. Recomendación: el PACCGC debe invocar explícitamente los tres artículos en su convenio constitutivo para blindar su continuidad ante cambios de gobierno; la invocación del Art. 409 (obligación de conservar el suelo) es especialmente relevante porque hace que el subsidio a la fertilización correctiva sea jurídicamente una obligación del Estado, no una discrecionalidad.
Código Orgánico del Ambiente (COA, 2017): Art. 8 (principio de adaptación), Art. 164 (páramos), Art. 194 (incentivos a la conservación), Art. 204 (cambio climático y sectores productivos)	Art. 164: los páramos son ecosistemas frágiles de alta montaña sujetos a una protección especial; las actividades productivas en el páramo deben ser compatibles con su conservación. Art. 194: el Estado establecerá incentivos económicos y no económicos para la conservación de los ecosistemas, incluyendo el pago por servicios ambientales. Art. 204: el Estado promoverá la adaptación al cambio climático en los sectores productivos vulnerables, con	El COA es el instrumento normativo de más alta relevancia para el PSE Socio Páramo propuesto en el Cap. 13: el Art. 194 habilita explícitamente el mecanismo de pago por servicios ambientales para el páramo ganadero, y el Art. 204 obliga al Estado a promover la adaptación del sector agropecuario. Brecha crítica: el reglamento del COA para el Art. 164 prohíbe nuevas actividades ganaderas en el páramo pero no tiene disposiciones para la ganadería ya existente en el páramo ni para su transición hacia sistemas de menor impacto — este vacío normativo es el obstáculo legal que impide que los ganaderos del Tipo I accedan al PSE sin reformas reglamentarias. Recomendación de reforma: adición de un artículo al reglamento del COA (Art. 164-A propuesto) que habilite el acceso al PSE para ganaderos del páramo ya establecidos que adopten un plan de manejo sostenible certificado por el MAG-Carchi y el MAATE.

Instrumento Normativo Vigente	Disposición Relevante para la Ganadería del Páramo del Carchi	Brecha de Implementación, Alineación con las Propuestas del Cap. 13 y Recomendación de Reforma
	prioridad en el sector agropecuario.	
Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria (LORSA, 2010): Art. 22 (seguros y sistemas de subsidio para pequeños productores), Art. 27 (incentivos a la producción agroecológica), Art. 14 (fomento de la producción campesina)	Art. 22: el Estado creará un sistema de seguros para los pequeños y medianos productores y establecerá subsidios temporales frente a desastres naturales y ambientales de fuerza mayor. Art. 14: el Estado fomentará la producción campesina a través de crédito, asistencia técnica, seguro agrícola y mecanismos de comercialización que protejan al productor.	El Art. 22 de la LORSA es la habilitación legal más directa para el Seguro Climático Indexado Dual (SID) propuesto en el Cap. 13: establece la obligación del Estado de crear seguros para pequeños productores. Sin embargo, el reglamento de la LORSA no incluye los seguros indexados paramétricos entre los mecanismos habilitados — solo reconoce el seguro de daño verificado del Banco del Estado y de AGROSEGURO. Brecha: el SID requiere una reforma reglamentaria de la LORSA (adición de los microseguros agropecuarios paramétricos como instrumento habilitado por el Art. 22) y la aprobación de la Resolución SB-2019-0420 de la Superintendencia de Bancos (ya emitida pero sin reglamento operativo para la ganadería de páramo). Recomendación: el PACCGC debe presentar al MAGAP y a la Superintendencia de Bancos una propuesta de reglamento operativo del microseguro paramétrico ganadero del páramo, con el diseño del SID del Cap. 13 como base técnica.
Plan Nacional de Desarrollo Ecuador 2021–2025 (Eje 2, Objetivo 6: producción sostenible y soberanía alimentaria; Meta 6.3: incrementar la productividad del sector ganadero en el 12% al 2025)	Meta 6.3: incrementar la productividad ganadera provincial en el 12% al 2025, con énfasis en las provincias de la sierra norte (Carchi, Imbabura, Pichincha). Eje 2, Política 6.3.a: implementar programas de fertilización y mejoramiento de pasturas para los ganaderos de la sierra norte con financiamiento del MAGAP.	La Meta 6.3 del PND 2021–2025 es la alineación de política nacional más directa con el paquete de adaptación del corredor del Carchi: el encalado (IA-2) y la fertilización fosfatada (IA-1) son las intervenciones con mayor impacto sobre la productividad ganadera del Carchi (BCR = 4,8 y 6,2 respectivamente; Cap. 12), y la Política 6.3.a habilita el financiamiento del MAGAP para estas intervenciones. Brecha: el PND no tiene desagregación a nivel de sistemas ganaderos por altitud (el corredor del páramo del Carchi no aparece como una unidad diferenciada de planificación); la ganadería de páramo (Tipos I y II) es invisible en el sistema de planificación nacional. Recomendación: incorporar el corredor ganadero del páramo del Carchi como una Zona de Planificación Agropecuaria Especial (ZPAE) en el próximo Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible (2026–2030), con indicadores diferenciados por tipo de sistema (Tipo I a Tipo IV) y metas de adaptación climática explícitas.
Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Gobierno Provincial	Objetivo Estratégico 3 del PDOT-GPC: fortalecer la cadena de valor de la leche del	El PDOT-GPC ya incluye el mejoramiento de pasturas y suelos como actividad estratégica, lo que significa que el PACCGC puede articularse con el plan territorial vigente sin requerir modificaciones

Instrumento Normativo Vigente	Disposición Relevante para la Ganadería del Páramo del Carchi	Brecha de Implementación, Alineación con las Propuestas del Cap. 13 y Recomendación de Reforma
del Carchi (PDOT-GPC, 2019–2024): Capítulo de Producción Agropecuaria, Objetivo Estratégico 3 (ganadería sostenible de la sierra norte)	Carchi con énfasis en la mejora de la calidad nutricional del forraje y el acceso al mercado. Actividad 3.2: financiamiento de programas de mejoramiento de pasturas y suelos ganaderos en la sierra norte del Carchi. Actividad 3.4: articulación con el INIAP para el mejoramiento genético del hato ganadero provincial.	al PDOT. Brecha: el PDOT-GPC no incluye el riesgo climático ENSO-ONI como variable de planificación agropecuaria; la ganadería del páramo es tratada como un sistema productivo estático, sin considerar su vulnerabilidad diferencial a la variabilidad interanual. Recomendación: incluir un capítulo específico de Adaptación Climática Ganadera en el PDOT-GPC 2025–2030 (próxima actualización), usando el mapa de riesgo climático del corredor ganadero del Carchi producido por el proyecto UPEC como capa de planificación territorial. La UPEC y el PACCGC deben entregar el mapa de riesgo al GAD Provincial como insumo para la actualización del PDOT en 2025.

Nota. Elaboración propia.

14.2.2 El Vacío Más Costoso: la Ganadería del Páramo como Zona Gris Normativa

El análisis normativo pone de manifiesto que la ganadería en el páramo del Carchi se sitúa en un ámbito de regulación con tensiones normativas dentro del marco legal ecuatoriano. No es completamente ilegal, ya que la Constitución asegura la soberanía alimentaria y el derecho a la actividad agropecuaria familiar. Pero tampoco está del todo autorizada, dado que el COA prohíbe nuevas actividades ganaderas en el páramo y no establece disposiciones para las que ya existen (Asamblea Nacional del Ecuador., 2008)

Esta falta de claridad legal tiene tres implicaciones prácticas para el PACCGC: (1) El ganadero de Tipo I se enfrenta a la imposibilidad de acceder al PSE, ya que la ganadería en el páramo se encuentra al pie del régimen de prohibición delineado en el Art. 164 del COA; (2) El MAG-Carchi se ve impedido de ofrecer créditos con garantía de propiedad a las fincas del páramo, debido a que la incertidumbre sobre la legalidad de la actividad disminuye el valor de la garantía; y (3) El SDIA no puede ser implementado como subsidio para una actividad

"Nosotros estamos en tierra de nadie. El gobierno nos dice que cuidemos el páramo, pero tampoco nos da herramientas para hacerlo. Y si tocamos el páramo para sembrar pasto, nos dicen que estamos dañando el ecosistema. No sabemos qué hacer." (Testimonio de ganadero del Tipo I, cantón Bolívar, taller de validación del diagnóstico normativo, agosto 2024).

14.3 El Paquete de Cinco Instrumentos de Política

Tabla 67.

Paquete de Cinco Instrumentos de Política para la Gestión del Riesgo Climático en la Ganadería del Páramo del Carchi: Diseño, Justificación y Condiciones de Implementación

Instrumento de Política	Tipo de Instrumento y Nivel de Gobierno Responsable	Diseño, Justificación con Base en los Hallazgos del Libro y Condiciones de Implementación
IP-1: Subsidio Diferenciado a Insumos de Adaptación (SDIA): transferencia directa de insumos (cal agrícola, roca fosfórica, semilla de pasturas mixtas) a las fincas del Tipo I del corredor que suscriben el PACCGC	Instrumento de gasto público. Nivel de gobierno: MAGAP (financiamiento central) + MAG-Carchi (implementación provincial). Marco legal habilitante: Política 6.3.a del PND 2021–2025 + Art. 22 LORSA. Mecanismo de entrega: certificados de insumo canjeables en almacenes agropecuarios participantes del corredor (Tulcán, San Gabriel, Bolívar); el ganadero presenta el certificado en el almacén; el almacén descuenta el 30% del valor del insumo; el MAG-Carchi reembolsa el 30% al almacén mensualmente.	El SDIA es preferible al subsidio en efectivo (el modelo de las Transferencias No Condicionadas del MAGAP) por tres razones específicas al contexto del corredor: (1) asegura que el subsidio se use para la intervención de adaptación (el certificado es específico para cal agrícola, roca fosfórica o semilla — no puede usarse para otros productos); (2) activa el sistema comercial local de los almacenes agropecuarios del corredor como canal de entrega, reduciendo los costos de transacción del MAG-Carchi; y (3) genera un incentivo de adopción sostenido a lo largo del tiempo (el ganadero sabe que el año próximo puede obtener el subsidio si sigue suscrito al PACCGC, lo que reduce la tasa de abandono del programa). El SDIA tiene precedentes exitosos en Ecuador: el programa de insumos subsidiados de la MAGAP para la soya y el maíz en la Costa ha demostrado tasas de uso del 92% de los certificados emitidos vs. tasas de uso de las transferencias en efectivo del 64% para el mismo propósito. El monto del SDIA para el PACCGC: USD 114.000/año para IA-1 e IA-2 (30% del costo total de estas intervenciones para las 620 fincas del Tipo I al 100% de cobertura; consistente con el presupuesto del MAG-Carchi de la Tabla 12.3 del Cap. 12).
IP-2: Crédito de Adaptación Climática	Instrumento de crédito público. Nivel de gobierno: BanEcuador (implementación) + MAGAP	La barrera de capital inicial es el obstáculo más importante para la adopción de IA-1 (dosis correctiva año

Instrumento de Política	Tipo de Instrumento y Nivel de Gobierno Responsable	Diseño, Justificación con Base en los Hallazgos del Libro y Condiciones de Implementación
(CAC): línea de crédito de bajo costo con período de gracia para financiar la inversión inicial del Paquete Básico de Adaptación en las fincas del Tipo I que no pueden financiar la dosis correctiva inicial de encalado y fertilización fosfatada con su flujo de caja	(garantía parcial). Marco legal habilitante: Art. 22 LORSA + Decreto Ejecutivo 1012/2020 (crédito de desarrollo productivo rural). Condiciones del CAC: monto máximo USD 2.400/finca (suficiente para financiar la dosis correctiva inicial de IA-1 e IA-2 en los dos primeros años del programa); tasa: 5,5%/año (tasa subsidiada de BanEcuador para el sector agropecuario, 2024); período de gracia: 18 meses (el período de tiempo necesario para que los beneficios del encalado y la fertilización fosfatada se reflejen en el ingreso ganadero y generen flujo de caja para el servicio de la deuda); plazo total: 5 años; garantía: prenda sobre el hatu y el análisis de suelo del LABONORT como evidencia de la inversión realizada.	1: USD 680) e IA-2 (año 1: USD 420): el flujo de caja del Tipo I promedio (margen neto USD 322/mes, Tabla 10.2 del Cap. 10) no permite absorber una inversión de USD 1.100 en el primer año del programa. El CAC con período de gracia de 18 meses resuelve exactamente este problema: el ganadero hace la inversión en los meses 1–2 del programa y no empieza a pagar sino en el mes 19, cuando ya tiene evidencia de los primeros beneficios de la mejora del suelo (la PPNA empieza a responder al encalado y la fertilización fosfatada entre los meses 6 y 18 post-aplicación, según los datos de las UPAs sentinela del proyecto; Cap. 7). La tasa del 5,5% del CAC implica un costo financiero de USD 132/año para los USD 2.400 del préstamo —que el BCR de 6,2 de IA-1 y 4,8 de IA-2 cubre ampliamente. BanEcuador tiene presencia en todos los cantones del corredor del Carchi y tiene experiencia en el crédito agropecuario de la sierra norte; la articulación PACCGC-BanEcuador para la línea CAC es una extensión de las líneas de crédito agropecuario existentes, no un nuevo instrumento.
IP-3: Norma de Contenido Mínimo Proteico del Forraje (NCMPF): norma técnica provincial que establece el umbral de 14% de PC como mínimo de calidad del forraje de venta en el	Instrumento regulatorio. Nivel de gobierno: AGROCALIDAD (norma técnica nacional) + MAG-Carchi (implementación provincial). Marco legal habilitante: Art. 26 LORSA (normas de calidad de los insumos agropecuarios) + Reglamento de Inocuidad Agropecuaria. Mecanismo de implementación: certificación voluntaria de calidad del forraje (análisis de PC en LABONORT-UPEC: USD 18/muestra); premio de precio: USD 0,04/kg MS adicional al	La NCMPF es el instrumento que vincula la mejora del suelo (IA-1 e IA-2) con el precio que el ganadero recibe por la leche: el forraje con $PC \geq 17\%$ (el umbral de las pasturas mixtas bien manejadas con suelo corregido; Cap. 7, Tabla 7.5) produce una leche con mayor contenido proteico que los centros de acopio pueden diferenciar en precio y que el procesador industrial paga a premium. La cadena de valor implícita es: corrección del suelo (IA-1 + IA-2) → pasturas mixtas (IA-3) → forraje con $PC \geq 17\%$ → leche con mayor proteína → precio diferenciado

Instrumento de Política	Tipo de Instrumento y Nivel de Gobierno Responsable	Diseño, Justificación con Base en los Hallazgos del Libro y Condiciones de Implementación
corredor ganadero del Carchi, con incentivos de precio para el forraje que supere el 17% de PC	precio de mercado para el forraje certificado con PC $\geq$ 17%; el premio es financiado por los centros de acopio que participan del esquema (3 centros de acopio del corredor: COCUMELAC, Agrolácteos del Norte, Fontierras) como diferenciación de precio de la leche de mayor calidad composicional.	→ mayor ingreso del ganadero → retorno sobre la inversión en el paquete de adaptación. Sin la NCMPF, el ganadero que mejora su suelo y sus pasturas produce leche de mayor calidad pero la vende al mismo precio que el ganadero que no lo hace — el mercado no recompensa la adaptación. La NCMPF cierra ese vacío. El precedente más relevante en el Ecuador es el sistema de pago por calidad composicional de la leche implementado por el MAGAP en 2013 (Acuerdo Ministerial 394): el pago diferenciado por sólidos totales de la leche ya existe y funciona; la NCMPF extiende ese sistema al contenido proteico del forraje como indicador intermedio.
IP-4: Ordenanza Provincial de Carga Animal Máxima en el Páramo (OPCAM): ordenanza del GAD Provincial del Carchi que establece un umbral de carga animal de 1,2 UBAs/ha en el páramo ganadero del corredor (entre 3.200 y 4.000 msnm) con un mecanismo de compensación PSE para los ganaderos que	Instrumento regulatorio + incentivo. Nivel de gobierno: GAD Provincial del Carchi (aprobación por el Consejo Provincial). Marco legal habilitante: Art. 194 COA (pago por servicios ambientales) + Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD, Art. 42 lit. e: competencia de los gobiernos provinciales en la gestión ambiental de los ecosistemas de páramo). Mecanismo: ganadero que certifica carga animal $\leq$ 1,2 UBAs/ha (certificación anual del MAG-Carchi) recibe el pago PSE Socio Páramo de USD 392–588/finca/año; ganadero que supera 1,2 UBAs/ha recibe notificación de regularización; si supera 1,6 UBAs/ha por dos años consecutivos, pierde el acceso al SDIA y al CAC.	La OPCAM es el instrumento que articula la adaptación climática con la conservación del páramo: el umbral de 1,2 UBAs/ha corresponde al umbral de no degradación neta del pastizal del páramo del Carchi estimado por el Cap. 5 (Tabla 5.4) — la carga animal máxima por encima de la cual la velocidad de degradación del pastizal supera la capacidad de recuperación del suelo. La carga animal media del Tipo I es actualmente de 1,1 UBAs/ha (dentro del umbral), pero la variabilidad es alta: el 28% de las fincas del Tipo I supera 1,2 UBAs/ha durante El Niño fuerte porque la caída de la PPNA (–42% durante El Niño fuerte en el Tipo I; Cap. 7) reduce la capacidad de carga sin que el ganadero reduzca el hato. La OPCAM crea el incentivo permanente de mantener el hato dentro del umbral y amortigua el impacto del El Niño fuerte sobre el páramo: el ganadero que sabe que puede perder el PSE si supera la carga máxima tiene incentivo de activar el

Instrumento de Política	Tipo de Instrumento y Nivel de Gobierno Responsable	Diseño, Justificación con Base en los Hallazgos del Libro y Condiciones de Implementación
cumplan el umbral		protocolo de contingencia (reservas de forraje IA-4, suplementación energética) antes de sobrecargar el pastizal. La articulación OPCAM-SID (el ganadero que mantiene la carga $\leq 1,2$ UBAs/ha recibe también el trigger reducido del SID; Cap. 13, Tabla 13.3) crea un sistema de incentivos integrado y coherente.
IP-5: Sistema Provincial de Información Agropecuaria del Páramo (SPIAP): plataforma digital de datos de monitoreo continuo de los suelos, el clima y la producción de leche del corredor ganadero del Carchi, integrada con el sistema de alerta temprana ENSO-ONI de la UPEC	Instrumento de información y gestión del conocimiento. Nivel de gobierno: UPEC (operación técnica) + MAG-Carchi (co-financiamiento y uso para la toma de decisiones de política). Marco legal habilitante: Art. 281 Constitución (soberanía alimentaria requiere información de calidad sobre el sector agropecuario) + Ley Orgánica del Sistema Nacional de Información (LSNI, 2010, Art. 9: las instituciones del Estado están obligadas a generar y compartir la información estadística necesaria para la planificación del desarrollo). Datos que integra: resultados de los análisis de suelo de las 620 fincas del Tipo I (LABONORT-UPEC); datos de precipitación y temperatura de las 4 estaciones agrometeorológicas del corredor (INAMHI + UPEC); datos de producción de leche de las 80 UPAs sentinela (recopilados mensualmente por los extensionistas del MAG-Carchi); datos de biomasa de los potreros de las UPAs sentinela (RPM quincenal); precio al productor de leche por cantón (MAGAP semanalmente); índice ONI (NOAA en tiempo real). Usuarios principales del SPIAP: MAG-Carchi (decisiones de asistencia	El SPIAP es la infraestructura de datos que hace posibles todos los demás instrumentos: sin datos de suelo actualizados, el SDIA no puede focalizar el subsidio en las fincas con mayor déficit de P y pH; sin datos de biomasa y producción de leche, el FCCG no puede calibrar los triggers del SID; sin datos climáticos integrados, el sistema de alerta no puede generar las alertas automáticas del protocolo de contingencia. El costo del SPIAP (USD 42.000/año para operación, mantenimiento de servidores, actualización del modelo predictivo y costos de conectividad de las 80 UPAs sentinela) es el de menor costo relativo de todos los instrumentos de política y el de mayor impacto multiplicador: el valor de la información que el SPIAP produce — estimado en USD 120.000/año como costo equivalente de un programa de monitoreo convencional del INIAP (Tabla 12.3 del Cap. 12)— es 2,86 veces el costo de operación del sistema. El SPIAP puede expandirse progresivamente: el primer año cubre solo las 80 UPAs sentinela; al año 5 del programa puede cubrir el 30% de las fincas del Tipo I del corredor (186 fincas) con sensores de bajo costo (estaciones meteorológicas automáticas de USD 180/unidad con transmisión LoRaWAN).

Instrumento de Política	Tipo de Instrumento y Nivel de Gobierno Responsable	Diseño, Justificación con Base en los Hallazgos del Libro y Condiciones de Implementación
	técnica y subsidios), GAD Provincial del Carchi (PDOT), FEDEGAN-Carchi (gestión gremial), FCCG (actuarial del seguro), UPEC (investigación adaptativa).	

Nota. Elaboración propia.

14.3.1 La Coherencia del Paquete: Cómo los Cinco Instrumentos se Refuerzan Mutuamente

El conjunto de cinco herramientas es mucho más que solo la suma de sus elementos, ya que están diseñadas para complementarse entre sí gracias a un mecanismo central: el análisis anual de suelo del SPIAP. El ganadero que realiza el análisis de suelo (IA-5) recibe un diagnóstico que le indica los insumos que necesita; estos insumos son financiados por el SDIA (si puede cubrir el 70% restante) o por el CAC (si requiere un crédito para la dosis correctiva inicial).

Al mejorar la calidad de su suelo, el ganadero produce forraje que supera el umbral de la NCMPEF, lo que le permite obtener un precio premium. Además, al mantener la carga animal por debajo del umbral de la OPCAM, recibe el PSE Socio Páramo. Todos los datos recopilados durante este ciclo —análisis de suelo, biomasa, producción de leche y precio recibido— alimentan el SPIAP, que ajusta el modelo predictivo del sistema de alerta y los triggers del SID.

Para un ganadero del Tipo I que no ha participado en ningún programa agropecuario, el punto de entrada al sistema es IA-5: el análisis de suelo gratuito de la Fase 0. Esta decisión de diseño —hacer del análisis de suelo el primer paso en lugar de ofrecer subsidios a los insumos— es intencionada. El análisis de suelo establece una relación entre el ganadero y el sistema de información (el SPIAP), genera los datos que el extensionista utiliza para brindar asistencia técnica personalizada y proporciona la evidencia objetiva (el resultado del análisis) que hace que el ganadero confíe en el paquete técnico.

La experiencia de los diagnósticos participativos del proyecto (UPEC, 2023–2024) reveló que el análisis de suelo gratuito es la herramienta más efectiva para atraer a los ganaderos del Tipo I: de los 96 ganaderos del Tipo I invitados a los talleres de diagnóstico, 88 (92%) participaron

al ofrecerse el análisis de suelo gratuito; mientras que solo 34 (35%) habrían asistido a un taller sin el incentivo del análisis.

14.4 Marco de Gobernanza Multinivel

Tabla 68.

Marco de Gobernanza Multinivel del PACCGC: Cuatro Niveles, Instrumentos de Articulación, Actores y Flujos de Información

Nivel de Gobernanza	Instrumento de Articulación Propuesto	Actores del Nivel	Función de Coordinación y Flujo de Información entre Niveles
NIVEL 1 — Finca (micro): gestión del riesgo climático a escala de la unidad productiva	Sistema de alerta temprana ENSO-ONI (IA-5) + Protocolo de Contingencia Diferenciado El Niño / La Niña (Cap. 13) + Registro digital de suelo, producción y clima en la aplicación del SPIAP	Ganadero del Tipo I + Extensionista del MAG-Carchi (visita mensual durante el período de adopción del paquete + visita trimestral en régimen de autosostenibilidad)	El ganadero es el actor de menor escala pero el de mayor impacto directo sobre el sistema: sus decisiones de manejo del suelo (aplicar o no encalar, ajustar o no la carga animal durante El Niño) determinan el resultado final del programa. El flujo de información del Nivel 1 al Nivel 2 es a través del SPIAP: los datos de producción de leche y biomasa que el ganadero registra (con apoyo del extensionista) alimentan el modelo predictivo del SPIAP que el MAG-Carchi usa para las decisiones del Nivel 2. El flujo del Nivel 2 al Nivel 1 es a través de las alertas automáticas del sistema de alerta (que llegan al teléfono del ganadero y del extensionista simultáneamente) y de las visitas del extensionista para la activación del protocolo de contingencia.
NIVEL 2 — Corredor (meso): gestión del riesgo climático a escala del corredor ganadero del páramo del Carchi (los 4 cantones del corredor: Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira)	PACCGC (Convenio MAG-Carchi / UPEC / INIAP / FEDEGAN-Carchi) + FCCG (Fondo de Compensación Climática Ganadero del Carchi) + Comité Técnico del SPIAP (sesiones mensuales de revisión de los datos del	MAG-Carchi (coordinación) + UPEC (operación técnica) + INIAP (investigación) + FEDEGAN-Carchi (representación de los ganaderos) + 4 extensionistas del corredor	El Nivel 2 es el núcleo operativo del programa: donde los instrumentos de política (SDIA, CAC, OPCAM) se implementan, donde el FCCG acumula y distribuye las reservas del seguro, y donde el Comité Técnico del SPIAP toma las decisiones de actualización del protocolo de contingencia basadas en los datos del monitoreo. El flujo del Nivel 2 al Nivel 3 es a través de los reportes anuales del PACCGC al MAGAP y al GAD Provincial y de las solicitudes de ajuste normativo (reforma del reglamento del COA

Nivel de Gobernanza	Instrumento de Articulación Propuesto	Actores del Nivel	Función de Coordinación y Flujo de Información entre Niveles
	monitoreo y actualización del protocolo de contingencia)		Art. 164, reglamento operativo del SID) que el Nivel 2 eleva al Nivel 3. El flujo del Nivel 3 al Nivel 2 es a través del financiamiento público nacional (Plan Nacional Ganadería Lechera Sostenible, Fondo de Adaptación UNFCCC) y de las reformas normativas que el Nivel 3 aprueba.
NIVEL 3 — Provincial/Nacional (macro): marco normativo y financiamiento de la adaptación climática ganadera del páramo a escala provincial y nacional	Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible 2023–2030 (MAGAP) + Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN) del Ecuador ante el Acuerdo de París (compromiso de adaptación del sector agropecuario) + PDOT-GPC 2025–2030 (GAD Provincial del Carchi)	MAGAP (nivel nacional) + MAATE (cambio climático) + BanEcuador (crédito agropecuario) + GAD Provincial del Carchi + Superintendencia de Bancos	El Nivel 3 provee el marco normativo y financiero que hace posibles los instrumentos del Nivel 2: sin la reforma reglamentaria del COA Art. 164 (que el Nivel 3 debe aprobar), el PSE Socio Páramo no puede implementarse; sin la línea CAC de BanEcuador (que requiere aprobación del directorio del banco a nivel nacional), el crédito de adaptación no está disponible; sin la incorporación del corredor ganadero del páramo del Carchi como ZPAE en el Plan Nacional Ganadería Lechera Sostenible (que requiere aprobación del MAGAP), el financiamiento nacional del PACCGC no está asegurado. El Nivel 3 tiene el horizonte de planificación más largo (10 años para el PND, 4 años para el PDOT) lo que permite anticipar las necesidades del Nivel 2 con el tiempo suficiente para desarrollar los instrumentos. La articulación más crítica del Nivel 3 es la incorporación del PACCGC en la CDN del Ecuador ante el Acuerdo de París como medida de adaptación del sector agropecuario: esto haría al PACCGC elegible para el financiamiento del Fondo de Adaptación UNFCCC y del Fondo Verde para el Clima (GCF), reduciendo la dependencia del presupuesto nacional y provincial.
NIVEL 4 — Internacional (macro+):	Contribución Determinada a Nivel Nacional	MAATE (DNA del Fondo de Adaptación	El Nivel 4 provee dos funciones que ningún nivel inferior puede suplir: (1) el financiamiento

Nivel de Gobernanza	Instrumento de Articulación Propuesto	Actores del Nivel	Función de Coordinación y Flujo de Información entre Niveles
financiamiento climático internacional y articulación con redes de investigación de la ganadería andina	(CDN) del Ecuador (MAATE) + Proyecto regional CGIAR-CIMMYT 'Adaptación de los Sistemas Ganaderos de Montaña al Cambio Climático en los Andes' (en negociación 2024) + Red de Investigación FONTAGRO para ganadería de alta altitud en los Andes	UNFCCC) + INIAP (red CGIAR) + UPEC (socios académicos andinos: UNAL Colombia, PUCP Perú, Musso Bolivia)	climático internacional — el Fondo de Adaptación UNFCCC tiene disponibles USD 4,8 M/proyecto para adaptación del sector agropecuario en países en desarrollo, y el PACCGC, con su base de evidencia de 12 capítulos y su arquitectura institucional de 4 niveles, tiene un perfil de elegibilidad muy alto; (2) la producción de conocimiento comparativo — la participación del PACCGC en la red CGIAR-CIMMYT para ganadería de montaña andina permite acceder a los desarrollos tecnológicos de variedades de pasturas termotolerantes y razas bovinas adaptadas al cambio climático que los niveles nacionales no pueden producir solos. El flujo del Nivel 4 al Nivel 3 es principalmente de financiamiento (subvenciones del GCF y el Fondo de Adaptación) y de tecnología (germoplasma, nuevas variedades); el flujo del Nivel 3 al Nivel 4 es de evidencia (los datos y resultados del PACCGC como contribución al conocimiento global sobre adaptación de la ganadería andina al cambio climático).

Nota. Elaboración propia.

14.5 Las Cuatro Reformas Normativas Prioritarias

Tabla 69.

Reformas Normativas Necesarias para la Implementación del PACCGC: Contenido, Urgencia, Horizonte Temporal y Actores Responsables

Reforma Normativa Necesaria	Instrumento Jurídico a Modificar y Nivel de Gobierno	Urgencia y Horizonte Temporal	Contenido de la Reforma y Actor Responsable de Impulsar el Proceso
RF-1: Habilitación legal del PSE Socio	Reglamento del COA Art. 164 (Decreto	URGENCIA CRÍTICA. Horizonte:	Añadir un Art. 164-A al Reglamento del COA que establezca: 'Los ganaderos con actividad establecida en

Reforma Normativa Necesaria	Instrumento Jurídico a Modificar y Nivel de Gobierno	Urgencia y Horizonte Temporal	Contenido de la Reforma y Actor Responsable de Impulsar el Proceso
Páramo para ganaderos del páramo ya establecidos con plan de manejo sostenible	Ejecutivo; nivel nacional). Requiere: aprobación del Presidente de la República a través del MAATE.	aprobación en 2025 (Fase 0 del PACCGC). Sin esta reforma, el PSE Socio Páramo del Cap. 13 no puede implementarse legalmente para ningún ganadero del Tipo I del corredor.	los ecosistemas de páramo con anterioridad a la vigencia del COA podrán acceder al mecanismo de pago por servicios ambientales del Art. 194 del COA si adoptan un Plan de Manejo Sostenible de Ganadería de Páramo (PMSGP) certificado por el MAG y el MAATE, con carga animal $\leq 1,2$ UBAs/ha y compromisos de conservación y restauración del suelo y el pastizal.' El PMSGP es el documento técnico que el extensionista del MAG-Carchi elabora con el ganadero del Tipo I (formulario estándar de 4 páginas; contenidos: resultado del análisis de suelo, protocolo de manejo del suelo adoptado, mapa de potreros con carga animal, compromisos de monitoreo anual). Actor responsable: UPEC y FEDEGAN-Carchi deben elaborar el borrador del Art. 164-A y presentarlo al MAATE a través del MAG-Carchi para el proceso de reforma reglamentaria.
RF-2: Reglamento operativo del microseguro agropecuario paramétrico ganadero para el SID del PACCGC	Resolución complementaria a la SB-2019-0420 de la Superintendencia de Bancos del Ecuador (nivel nacional). Requiere: aprobación de la Junta de Política y Regulación Financiera.	URGENCIA ALTA. Horizonte: aprobación en el primer semestre de 2026 (antes del lanzamiento del SID en la Fase 1). La SB-2019-0420 ya existe, pero no tiene reglamento operativo para la ganadería; el SID no puede operar sin el reglamento operativo.	El reglamento operativo debe incluir: (1) definición de la variable índice (ONI y SPI-3 local) y la fuente oficial de datos (NOAA para el ONI, INAMHI para el SPI-3); (2) los umbrales de activación por niveles (Nivel 1, 2, 3; Tabla 13.3 del Cap. 13) como estándares técnicos del microseguro paramétrico ganadero; (3) el procedimiento de liquidación automática (sin peritaje; transferencia bancaria o pago móvil en 15 días hábiles post-trigger); (4) el mecanismo de reaseguro obligatorio para coberturas de Nivel 3 (episodios extremos $ONI \geq +2,0^{\circ}C$); (5) el requisito de reservas mínimas del FCCG ($\geq 1,5 \times$ la pérdida esperada del peor episodio de los últimos 20 años). Actor responsable: UPEC (elaboración del borrador técnico) + Superintendencia de Bancos (proceso de aprobación regulatoria) +

Reforma Normativa Necesaria	Instrumento Jurídico a Modificar y Nivel de Gobierno	Urgencia y Horizonte Temporal	Contenido de la Reforma y Actor Responsable de Impulsar el Proceso
			BanEcuador (socio implementador del FCCG).
RF-3: Incorporación del corredor ganadero del páramo del Carchi como Zona de Planificación Agropecuaria Especial (ZPAE) en el Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible 2026–2030	Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible 2026–2030 (Acuerdo Ministerial del MAGAP; nivel nacional). Requiere: aprobación del Ministro de Agricultura.	URGENCIA ALTA. Horizonte: incorporación en el próximo Plan Nacional Ganadería Lechera Sostenible 2026–2030, cuya elaboración debe comenzar en 2025. Sin la ZPAE, el financiamiento del MAGAP para el PACCGC compite con todos los demás proyectos agropecuarios de la sierra ecuatoriana sin una asignación garantizada.	La ZPAE del corredor ganadero del páramo del Carchi (4 cantones: Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira; 3.200–4.000 msnm) debe incluir: (1) indicadores de desempeño diferenciados por tipo de sistema (Tipo I a Tipo IV) —no solo indicadores provinciales agregados que ocultan la situación del Tipo I más vulnerable; (2) metas explícitas de adaptación climática: pH medio del corredor $\geq 5,6$ al 2030, P disponible medio ≥ 16 mg/kg al 2030, producción media del Tipo I $\geq 7,7$ L/vaca/día al 2030; (3) asignación presupuestaria garantizada del MAGAP para el PACCGC de USD 380.000/año durante la Fase 1 (2026–2027) como partida fija del Plan Nacional, no como concurso anual de proyectos; (4) articulación explícita con la CDN del Ecuador ante el Acuerdo de París (el PACCGC como medida de adaptación del sector ganadero reportada al UNFCCC). Actor responsable: UPEC y MAG-Carchi deben presentar la propuesta de ZPAE al MAGAP en el primer trimestre de 2025.
RF-4: Ordenanza Provincial de Carga Animal Máxima en el Páramo (OPCAM) del GAD Provincial del Carchi	Ordenanza del GAD Provincial del Carchi (aprobación por el Consejo Provincial; nivel provincial). Requiere: aprobación por mayoría simple del Consejo Provincial (6 de los 10 consejeros).	URGENCIA MEDIA. Horizonte: aprobación en 2026 (primer año de la Fase 1). La OPCAM no es condición previa para el lanzamiento del PACCGC (la Fase 0 puede comenzar sin ella) pero es necesaria para la articulación del PSE Socio Páramo con el	La OPCAM debe establecer: (1) el umbral de carga animal de 1,2 UBAs/ha en el páramo ganadero del corredor (entre 3.200 y 4.000 msnm) como umbral de sostenibilidad (no como prohibición); (2) el proceso de certificación de carga animal por el MAG-Carchi (verificación anual usando conteo de cabezas y medición del área de pastizal efectivo del RPM); (3) el vínculo entre la certificación de carga animal y el acceso al PSE Socio Páramo (los ganaderos con certificación $\leq 1,2$ UBAs/ha son elegibles para el PSE; los que superan 1,2 UBAs/ha reciben un plan de regularización de 12 meses antes de perder el acceso al PSE); (4) la

Reforma Normativa Necesaria	Instrumento Jurídico a Modificar Nivel Gobierno	Urgencia y Horizonte Temporal	Contenido de la Reforma y Actor Responsable de Impulsar el Proceso
		instrumento regulatorio de carga animal.	excepción temporal durante episodios El Niño declarados (el ganadero que supera temporalmente el umbral de carga durante El Niño por reducción de la PPNA —y puede demostrarlo con los datos del SPIAP— no pierde el PSE si activa el protocolo de contingencia dentro de los 30 días siguientes a la alerta). Actor responsable: UPEC y MAG-Carchi proponen la ordenanza; FEDEGAN-Carchi hace el cabildeo político con los 10 consejeros provinciales; el GAD Provincial aprueba.

Nota.. Elaboración propia.

14.5.1 El Orden Correcto de las Reformas: Por qué RF-1 es la Condición de Todo lo Demás

Las cuatro reformas normativas están interconectadas de manera secuencial, lo que establece el orden correcto en la agenda de política. La RF-1, que se refiere a la habilitación legal de la ganadería en el páramo con un plan de manejo, es esencial para que la RF-4, que corresponde a la OPCAM, pueda implementarse. Esta última solo puede llevarse a cabo una vez que la ganadería en el páramo esté legalmente habilitada bajo un régimen de manejo sostenible (Asamblea Nacional del Ecuador., 2008).

A su vez, la RF-4 es fundamental para que el PSE Socio Páramo funcione plenamente, dado que los ganaderos que cumplen con los requisitos de la OPCAM pueden acceder al PSE. Este programa, a su vez, ofrece cofinanciamiento para un paquete técnico que cierra el triángulo de financiamiento de la adaptación del Tipo I, tal como se menciona en el Capítulo 13.

Por otro lado, la RF-3, que se refiere a la ZPAE en el Plan Nacional de Ganadería Lechera Sostenible, es crucial para asegurar el financiamiento nacional continuo del PACCGC. Sin la asignación presupuestaria garantizada por el MAGAP como partida fija del Plan Nacional, el PACCGC se vuelve dependiente de la voluntad de cada ministro en funciones, lo cual

representa una vulnerabilidad política inaceptable para un programa que busca un horizonte de 10 años.

En cuanto a la RF-2, que abarca el reglamento operativo del SID, esta puede avanzar simultáneamente con las otras reformas, dado que su aprobación depende de la Superintendencia de Bancos, un organismo técnico que goza de mayor independencia política. Por lo tanto, la agenda política del PACCGC debe iniciar de manera simultánea en dos frentes críticos: la RF-1 ante el MAATE y la RF-3 ante el MAGAP, en el primer trimestre de 2025.

14.6 Marco de Monitoreo y Evaluación

Tabla 70.

Marco de Monitoreo y Evaluación del PACCGC: Seis Indicadores con Línea de Base 2024, Metas al 2030 y 2035, y Sistema de Reporte

Indicador de Monitoreo y Evaluación	Línea de Base (2024)	Meta al 2030 (Fase 2) y al 2035 (Fase 3)	Fuente de los Datos, Frecuencia de Medición y Responsable
pH medio del suelo de las UPAs del Tipo I del corredor (muestra de las 80 UPAs sentinela del SPIAP; indicador del impacto del encalado sobre la acidez del suelo)	pH = $5,1 \pm 0,4$ (Cap. 5, Tabla 5.2; n = 240 muestras del diagnóstico 2022–2023)	Meta 2030: pH $\geq 5,6$ en el 60% de las UPAs del Tipo I del corredor (con encalado correctivo completado en todos los bloques de la Fase 2). Meta 2035: pH $\geq 5,8$ en el 75% de las UPAs del Tipo I.	LABONORT-UPEC (análisis de suelo completo). Frecuencia: anual (muestreo en agosto–septiembre de cada año). Responsable: UPEC (diseño muestral) + extensionistas del MAG-Carchi (toma de muestras) + LABONORT (análisis). Los resultados se ingresan al SPIAP dentro de los 20 días hábiles del análisis.
P disponible medio de las UPAs del Tipo I del corredor (indicador del impacto de la fertilización fosfatada sobre la limitación principal de la PPNA del páramo)	P = $7,4 \pm 3,2$ mg/kg (Cap. 5, Tabla 5.3; 78% de las UPAs por debajo del umbral de suficiencia de 20 mg/kg)	Meta 2030: P ≥ 14 mg/kg en el 60% de las UPAs del Tipo I (umbral intermedio de mejora, consistente con 2–3 años de fertilización fosfatada correctiva + mantenimiento). Meta 2035: P ≥ 18 mg/kg en el 70% de las UPAs del Tipo I (umbral de suficiencia casi alcanzado).	LABONORT-UPEC. Frecuencia: anual (misma muestra que el pH). El indicador P se monitorea junto con el pH en el mismo análisis porque la respuesta del P a la fertilización depende del pH (el encalado potencia la eficiencia del fertilizante fosfatado). El SPIAP presenta los indicadores pH y P juntos para facilitar la interpretación integrada de la respuesta del suelo a las intervenciones IA-1 e IA-2.

Indicador de Monitoreo y Evaluación	Línea de Base (2024)	Meta al 2030 (Fase 2) y al 2035 (Fase 3)	Fuente de los Datos, Frecuencia de Medición y Responsable
PPNA media del pastizal del Tipo I del corredor (indicador del impacto integrado del paquete de adaptación sobre la productividad primaria neta aérea; medida con RPM quincenal en las 80 UPAs sentinela)	PPNA = 2.180 ± 380 kg MS/ha/año (Cap. 7, Tabla 7.2; media del Tipo I, años ENSO-neutros 2018–2022)	Meta 2030: PPNA ≥ 2.600 kg MS/ha/año en el 50% de las UPAs del Tipo I (incremento del 19% sobre la línea de base; consistente con el efecto esperado de la corrección del pH y el P sobre la PPNA según el modelo del Cap. 7). Meta 2035: PPNA ≥ 3.000 kg MS/ha/año en el 60% de las UPAs del Tipo I (incremento del 38%).	RPM (Rising Plate Meter) + modelo de estimación de PPNA (Cap. 7, ecuación calibrada: Biomasa = $-280 + 186 \times \text{RPM_height}$). Frecuencia: quincenal en las 80 UPAs sentinela del SPIAP (datos continuos); anual para la muestra completa del Tipo I (muestreo puntual en febrero, mayo, agosto y noviembre en 186 UPAs al Nivel 1 de la Fase 1; 620 UPAs al Nivel 2 de la Fase 2). Responsable: extensionistas del MAG-Carchi (medición quincenal en UPAs sentinela) + ganaderos capacitados (auto-medición en sus propios potreros con RPM prestado por el banco de equipos del PACCGC).
Producción media de leche del Tipo I (L/vaca/día; indicador del impacto económico final del paquete de adaptación sobre la principal fuente de ingreso del Tipo I)	7,4 ± 2,1 L/vaca/día (Cap. 8, Tabla 8.1; media del Tipo I años ENSO-neutros; 62 ± 18 L/finca/día)	Meta 2030: ≥ 7,7 L/vaca/día en el 50% de las UPAs del Tipo I (objetivo del Escenario Tendencial del Cap. 11, Tabla 11.2: +4% sobre la línea de base). Meta 2035: ≥ 8,4 L/vaca/día en el 40% de las UPAs del Tipo I (objetivo ambicioso consistente con el efecto combinado del suelo corregido + pasturas mejoradas + IA-6 primera generación genética; +14% sobre la línea de base).	Registros de producción del ordeño. Frecuencia: mensual en las 80 UPAs sentinela (datos continuos del SPIAP); anual para la muestra completa del Tipo I del corredor (encuesta de producción de septiembre–octubre de cada año). Los datos de producción se stratifican por tipo de sistema (I a IV) para detectar la respuesta diferencial del Tipo I al paquete de adaptación vs. los tipos sin intervención del programa.
Margen neto del Tipo I (USD/finca/año; indicador económico sintético del impacto del programa sobre	USD 3.870 ± 1.240/finca/año (Cap. 10, Tabla 10.2; media del Tipo I en años ENSO-neutros; bajo la línea de pobreza urbana	Meta 2030: margen neto ≥ USD 4.800/finca/año en el 50% de las UPAs del Tipo I (sobre la línea de pobreza urbana: +24% sobre la línea de base).	Encuesta de costos e ingresos ganaderos del PACCGC. Frecuencia: anual (encuesta de diciembre; datos del año calendario anterior). La encuesta utiliza el mismo instrumento del Cap. 10 para asegurar la comparabilidad temporal. El margen neto incluye el ingreso del PSE Socio Páramo (USD 392–588/finca/año

Indicador de Monitoreo y Evaluación	Línea de Base (2024)	Meta al 2030 (Fase 2) y al 2035 (Fase 3)	Fuente de los Datos, Frecuencia de Medición y Responsable
la viabilidad financiera del sistema de producción de menor escala del corredor)	ecuatoriana de USD 5.640/año = USD 470/mes)	Meta 2035: margen neto $\geq$ USD 5.200/finca/año en el 60% de las UPAs del Tipo I (+34% sobre la línea de base; consistente con el Escenario Tendencial del Cap. 11).	para los ganaderos calificados) que el SPIAP registra como ingreso separado del ingreso de la leche (para distinguir el efecto del PSE del efecto del paquete agronómico sobre el margen neto).
Índice de Persistencia Ganadera del Páramo (IPGP; porcentaje de las fincas del Tipo I activas al inicio del programa que siguen activas al año de medición; indicador de la retención de los ganaderos del páramo)	IPGP basal = 100% (año 0 del programa; todas las fincas activas). Proyección del Cap. 11 bajo SC (sin adaptación): IPGP = 72% al 2035 (28% de abandono esperado). Meta del programa: IPGP $\geq$ 91% al 2035 (máximo 9% de abandono — objetivo del Escenario Tendencial del Cap. 11).	Meta 2030: IPGP $\geq$ 95% (máximo 5% de abandono al 2030; consistente con los primeros efectos del paquete sobre el margen neto y la viabilidad financiera del Tipo I). Meta 2035: IPGP $\geq$ 91% (objetivo del ET del Cap. 11).	Registro de fincas activas del FEDEGAN-Carchi + MAG-Carchi. Frecuencia: anual (censo de fincas activas en el corredor en octubre de cada año). El IPGP es el indicador de mayor impacto político del programa: es el número que responde la pregunta '¿cuántas familias del páramo se salvaron gracias al programa?' y el que tiene mayor poder de comunicación ante los tomadores de decisiones del GAD Provincial y del MAGAP. Una finca del Tipo I que abandona la actividad representa en promedio 4 personas que migran del páramo, 1,7 menores en edad escolar que dejan la escuela rural y 14 ha de páramo ganadero con riesgo de degradación o conversión de uso (Cap. 13).

Nota. Elaboración propia.

14.6.1 El IPGP como Indicador Político de Mayor Impacto

De los seis indicadores del marco de M&E, el Índice de Persistencia Ganadera del Páramo (IPGP) destaca por su capacidad para comunicar cuestiones políticas. Esto se debe a que convierte los impactos biofísicos y económicos en un lenguaje que resuena con los alcaldes del corredor, el Gobernador del Carchi y el ministro de Agricultura: familias que optan por quedarse en el páramo frente a aquellas que deciden irse.

La comparación entre el IPGP en un escenario sin adaptación y uno con adaptación es reveladora. Sin adaptación, el índice se sitúa en el 72% para el 2035, lo que implica un 28% de

abandono, es decir, 174 familias del Tipo I que migran del páramo. En cambio, con adaptación, se espera que el IPGP alcance el 91% para el mismo año, con un máximo de solo 9% de abandono, lo que se traduce en un máximo de 56 familias migrantes.

La diferencia es impactante: 118 familias que deciden quedarse. Si multiplicamos estas 118 familias por 4 personas por hogar, tenemos 472 individuos que permanecen en el páramo. Además, de esos 472, el 42% son niños, lo que equivale a 198 menores que continúan su educación en las escuelas rurales. También, hay que considerar las 118 fincas que abarcan 14 hectáreas cada una, lo que suma un total de 1.652 hectáreas de páramo ganadero activo que se conserva.

Este es el dato que el alcalde de Espejo puede presentar al Consejo Provincial para respaldar la contribución de su cantón al FCCG. No se trata de un abstracto monto de USD 70.000 en impuestos prediales, sino de 472 personas que no se van, 198 niños que no abandonan sus estudios y 1.652 hectáreas de páramo que se mantienen saludables.

La narrativa política del PACCGC: de los indicadores técnicos al lenguaje de los tomadores de decisiones

Para el Ministro de Agricultura, el PACCGC está invirtiendo USD 164,000 al año del MAG-Carchi, generando una impresionante reducción de pérdidas en el sector ganadero, que asciende a USD 3,185,000 anuales (un BCR público de 19.4 veces). El programa se sostiene a sí mismo al reducir el gasto en emergencias durante fenómenos como El Niño. Por cada dólar que el MAGAP destina a este programa, la sociedad ecuatoriana recibe de vuelta USD 19.4.

Desde la perspectiva del Gobernador del Carchi, el PACCGC logra retener a 472 personas en el páramo, de las cuales 198 son menores de 18 años. Sin medidas de adaptación, estas personas podrían emigrar antes de 2035. Mantener a estas personas cuesta USD 164,000 al año; sin embargo, recuperar los servicios educativos y de salud rurales que se pierden cuando emigran resulta ser diez veces más costoso.

Para el alcalde del corredor, el PACCGC necesita un aporte del 0.8% del impuesto predial de su cantón, lo que equivale a entre USD 18,000 y 42,000 al año, dependiendo del cantón.

A cambio, el FCCG asegura que los ganaderos del páramo de su cantón cuentan con cobertura de seguro climático durante las temporadas de El Niño y La Niña, lo que disminuye la necesidad de asistencia de emergencia municipal.

En cuanto al ganadero del Tipo I, el paquete técnico del Capítulo 13 tiene un costo de USD 820 al año. Con el SDIA del MAG-Carchi, cubre el 48% de ese costo; además, con el PSE Socio Páramo, puede cubrir entre el 47% y el 71% adicional. Esto significa que el costo neto puede oscilar entre USD 0 y 440 al año. A cambio, recibe beneficios como la corrección del pH del suelo (que se mantendrá durante 10 años con un mantenimiento cada 3 años), un aumento en la producción de PPNA del 38% al tercer año, un incremento del 14% en la producción de leche al séptimo año, un margen neto del 34% para 2035, y cobertura de seguro climático contra El Niño y La Niña.

14.7 Síntesis del capítulo

La normatividad ecuatoriana ofrece fundamentos para la conservación de los páramos, la producción agropecuaria, así como la adaptación climática, aunque continúan presentes vacíos en la legislación en relación con la ganadería preexistente. En este sentido, la RF-1 tiene como objetivo establecer condiciones claras para su manejo de forma sostenible, así como contribuir con el acceso de financiamiento público e incentivos para el ambiente.

El paquete de políticas que lo compone integra subsidios, crédito, incentivos por calidad del forraje, conservación del páramo y un sistema de información climática. Su aplicación requiere coordinación entre MAG, MAATE, GAD del Carchi, organizaciones ganaderas y entidades financieras.

La propuesta contempla el seguimiento con indicadores de suelo, forraje, leche producida, rentabilidad y permanencia de las familias ganaderas, con unos objetivos para 2030 y otros para 2035. En todos los casos, la propuesta pretende, en conjunto, disminuir la vulnerabilidad climática, mejorar la rentabilidad ganadera y, al mismo tiempo, favorecer la conservación del páramo.

CAPÍTULO 15

Conclusiones, Limitaciones y Agenda de Investigación

Síntesis integradora de los quince capítulos, diez conclusiones sustantivas con sus números clave, cinco limitaciones con su efecto sobre las conclusiones y seis líneas de investigación futura con metodologías específicas



Objetivos del Capítulo

Al concluir la lectura de este capítulo final, el lector estará en capacidad de:

- **Sintetizar** en una narrativa integradora los hallazgos de los quince capítulos del libro, identificando los vínculos entre la cadena causal biofísica (Partes I–III), el análisis económico (Parte IV) y las propuestas de adaptación y política (Parte V).
- **Enumerar** las diez conclusiones sustantivas del libro con sus números clave: la cadena causal ENSO–suelo–leche, los coeficientes del SEM, la EAL de USD 6,4 M/año, el BCR privado de 5,8 y público de 19,4×, el punto de inflexión de inviabilidad en 2041 $\pm$ 4 años, la ventana de decisión de 12–17 años y el costo neto efectivo del paquete para el ganadero del Tipo I de USD 0–440/año.

- **Evaluar** las cinco limitaciones metodológicas del estudio —representatividad muestral, supuesto de linealidad del SEM, resolución del downscaling climático, omisión del trabajo no remunerado familiar y modelación de la frecuencia ENSO futura— con sus efectos sobre las conclusiones principales.
- **Priorizar** las seis líneas de investigación futura de la agenda de investigación: LI-1 (función de respuesta térmica no lineal de la microbiología del suelo), LI-2 (evaluación de impacto cuasi-experimental de la Fase 1 del PACCGC), LI-3 (proyecciones climáticas de alta resolución y ENSO futuro), LI-4 (replicabilidad del PACCGC en otros corredores del páramo ecuatoriano), LI-5 (economía del hogar campesino del Tipo I) y LI-6 (calibración actuarial y piloto del SID).
- **Articular** los hallazgos del libro en el contexto del debate académico y político más amplio sobre la adaptación de la ganadería de alta altitud al cambio climático en los Andes, y la posición del corredor del Carchi en ese debate.

15.1 Introducción: La Leche del Páramo como Metáfora del Sistema

El nombre del libro, *La Leche del Páramo*, no es solo una forma poética de hablar. Más bien, es una descripción directa de lo que se investiga y una declaración sobre cómo conocemos las cosas. La leche que se produce a 3.500 metros sobre el nivel del mar en el corredor del Carchi representa un sistema complejo de conexiones invisibles. Estas conexiones involucran el clima global —como el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur, que está a 10.000 km de distancia— la microbiología de los suelos volcánicos del páramo, que está a solo 20 centímetros de profundidad, la bioquímica en el rumen de las vacas Holstein que pastan a temperaturas de 4°C, y hasta el precio que el centro de acopio de Tulcán paga cada martes por el litro de leche recolectada.

Entender por qué la producción de leche del Tipo I disminuye un 51% durante un fuerte evento de El Niño no es un simple asunto de agronomía, climatología o economía; es un desafío que involucra sistemas. La caída en la producción no se debe a que las vacas tengan frío, ni a que llueva demasiado o muy poco, ni tampoco a que el precio sea bajo. Sucede porque la temperatura del suelo desciende 2,1°C durante un fuerte El Niño. Esta caída afecta las enzimas del suelo que son responsables de mineralizar el nitrógeno. Cuando el nitrógeno no se mineraliza, no llega al pasto, lo que significa que el pasto carece de nitrógeno y, por ende, tiene menos proteína. Las vacas que se alimentan de este pasto menos nutritivo producirán menos

leche, y la leche que falta significa que el ganadero del Tipo I no obtendrá el ingreso que necesita para cubrir sus costos y mantener a su familia.

Esta cadena de causas y efectos, que conecta el ONI con la producción de leche en nueve pasos, es una de las contribuciones más importantes de este libro. Se han cuantificado estas relaciones con coeficientes estructurales, datos de 355 Unidades Productivas Agropecuarias (UPAs) y un Modelo Estructural de Ecuaciones (SEM) con un CFI de 0,94. Antes de este estudio, esta dinámica no era completamente entendida. Era algo que los ganaderos del páramo del Carchi intuían, al decir que 'en los años del niño la producción cae' (una cita de un ganadero en el Cap. 1 que abre el libro). También era algo que los extensionistas del MAG-Carchi sospechaban al observar la relación entre los análisis de suelo con bajos niveles de fósforo y las épocas de mayor dificultad. Sin embargo, no se había demostrado con la precisión y el alcance necesarios para desarrollar políticas públicas y diseñar intervenciones efectivas en términos de costo. Esta demostración es la principal aportación del libro.

15.2 Síntesis de Hallazgos por Parte del Libro

Parte del Libro y Capítulos	Pregunta de Investigación Respondida	Hallazgo Principal, Número Clave y Contribución Teórica o Metodológica
PARTE I: Fundamentos y Contexto (Caps. 1–3)	¿Cuál es el contexto histórico, geográfico y científico de la ganadería de altura del Carchi y cuál es el estado del arte sobre la relación clima–suelo–producción ganadera en los Andes?	Hallazgo: la ganadería de altura del Carchi opera en uno de los gradientes altitudinales de suelo–climas más pronunciados de los Andes septentrionales, con una zonificación de cuatro tipos de sistema (Tipo I a Tipo IV) que captura el 85% de la varianza de productividad del corredor. Número clave: el Tipo I (3.200–4.000 msnm; 62% de las fincas del corredor) produce solo el 8,5% de la leche provincial con el 38% de los costos de producción por litro más altos — la ineficiencia no es cultural sino biofísica: es la expresión de la degradación del suelo y la vulnerabilidad climática acumulada en el segmento de menor escala y capitalización del corredor. Contribución metodológica: la tipología de cuatro sistemas basada en criterios de altitud, manejo y productividad, construida mediante análisis de conglomerados jerárquico con distancia euclidiana de Ward (n = 355 UPAs), es el primer instrumento de estratificación de la ganadería del páramo del Carchi basado en datos primarios a escala de corredor.
PARTE II: Diagnóstico Climático y Edáfico (Caps. 4–6)	¿Cómo actúa el ENSO sobre el clima del corredor del Carchi y cuál es el mecanismo bioquímico por el que el cambio de	Hallazgo: el 68% del efecto del ENSO sobre la producción de leche del Tipo I está mediado por la temperatura del suelo → actividad microbiana → disponibilidad de nutrientes (N mineral), no por el efecto directo del clima sobre la vaca. La cadena causal completa de El Niño fuerte en el Tipo I es: ONI +1,8°C → T _{soil} –2,1°C → N _{mineral} –58% → PPNA –42% + PC del forraje –8,6 pp → producción de leche –51%. Número

Parte del Libro y Capítulos	Pregunta de Investigación Respondida	Hallazgo Principal, Número Clave y Contribución Teórica o Metodológica
	temperatura del suelo se traduce en variación de la disponibilidad de nutrientes para las plantas?	clave: la urease y la deshidrogenasa del suelo del Tipo I se inhiben en un 52% y 44% respectivamente a temperaturas < 8°C (umbral promedio durante El Niño fuerte en el Tipo I), lo que explica por qué el Tipo I es 2,9 veces más vulnerable al ENSO que el Tipo IV con suelo manejado. Contribución teórica: el libro establece por primera vez la cadena causal ENSO–suelo–leche para un sistema ganadero andino con evidencia cuantitativa a escala de corredor — una síntesis que las publicaciones previas sobre el tema habían descrito solo cualitativamente o solo para componentes aislados de la cadena.
PARTE III: Producción de Biomasa y Leche (Caps. 7–9)	¿Cómo se traduce la variación de los nutrientes del suelo en variación de la biomasa del pastizal y de la producción de leche, y cuál es la magnitud de los coeficientes de la cadena causal completa?	Hallazgo: la caída de la PC del forraje (mecanismo proteico) explica el 42% del impacto del El Niño sobre la producción de leche del Tipo I, mientras que la reducción de la PPNA (mecanismo de cantidad de forraje) explica el 38%; los restantes 20% se distribuyen entre el aumento del IEP (10%) y el descarte forzoso (10%). El SEM del Cap. 9 cuantificó la cadena con CFI = 0,94 y RMSEA = 0,048 (ajuste bueno), con $R^2(\text{Ingreso}) = 0,86$ y $\beta_{\text{Nutri} \rightarrow \text{Ingreso}} = +0,66 > \beta_{\text{Precio} \rightarrow \text{Ingreso}} = +0,61$: la nutrición del suelo explica más del ingreso ganadero que el precio de la leche. Número clave: el coeficiente $\beta_{\text{total ONI} \rightarrow \text{Ingreso}} = -0,58$ con $p < 0,001$ — por cada unidad de anomalía positiva del ONI, el ingreso del Tipo I cae el equivalente a 0,58 desviaciones estándar, independientemente del nivel de tecnificación. Contribución metodológica: la aplicación del SEM multinivel con efectos moderadores de la tecnificación (modelo M2 con interacciones ONI×Tipo y N_mineral×Tipo, AIC 2.280 vs. 2.640 del modelo de regresión múltiple) es la primera aplicación de esta técnica a un sistema de producción ganadera de páramo de los Andes ecuatorianos.
PARTE IV: Análisis Económico (Caps. 10–12)	¿Cuál es el costo económico de la variabilidad climática ENSO para la ganadería del páramo del Carchi, y cuál es el retorno de las estrategias de adaptación?	Hallazgo: la Pérdida Anualizada Esperada (EAL) del sector ganadero del Carchi es de USD 6,4 M/año (IC95%: USD 4,8–8,2 M) = 41% del presupuesto MAG-Carchi = 3,9% del valor de producción ganadero provincial. Al 2050 bajo RCP 4.5 sin adaptación, el Tipo I promedio alcanza la inviabilidad económica en 2041 ± 4 años. El Paquete Básico de Adaptación tiene BCR privado = 5,8 (TIR = 42%, payback = 2,1 años) y BCR público = 19,4× (costo para el MAG-Carchi: USD 164.000/año = 1,05% de su presupuesto). Número clave: el costo de la ventana de adaptación (USD 820/finca/año) es el 14% del costo de no adaptar (USD 5.840/finca/episodio El Niño fuerte) — la adaptación es 7,1 veces más barata que la no-adaptación. Co-beneficios no monetizados: USD 10,2–20,3 M/año en servicios ecosistémicos del páramo conservado = 62–124 veces el costo del programa público. Contribución: la integración del ACB con el análisis de escenarios climáticos al 2050 (escenarios SC, ST, SA-A, SA-B) es la primera

Parte del Libro y Capítulos	Pregunta de Investigación Respondida	Hallazgo Principal, Número Clave y Contribución Teórica o Metodológica
		evaluación económica dinámica de la adaptación ganadera del páramo ecuatoriano.
PARTE V: Propuestas y Conclusiones (Caps. 13–15)	¿Qué propuestas concretas, viables y financiadas permiten implementar la adaptación climática en la ganadería del páramo del Carchi, bajo qué marco de política pública y con qué agenda de investigación?	Hallazgo síntesis: el PACCGC —Programa de Adaptación Climática Ganadera del Corredor del Carchi— es un sistema coherente de seis intervenciones técnicas (IA-1 a IA-6), cinco instrumentos de política (SDIA, CAC, NCMPF, OPCAM, SPIAP), cuatro reformas normativas (RF-1 a RF-4) y un seguro climático indexado dual (SID) que, implementado en cuatro fases al 2035, puede retener el 91% de las fincas del Tipo I activas (vs. el 72% esperado sin adaptación), elevar el margen neto del Tipo I sobre la línea de pobreza urbana (de USD 3.870 a USD 5.200/finca/año) y conservar 1.638 ha de páramo ganadero activo con un valor de servicios ecosistémicos de USD 10,2–20,3 M/año. La ventana de decisión de adaptación es de 12–17 años (Cap. 11); cada año de retraso en el inicio del programa aumenta el VAN de las pérdidas acumuladas del Tipo I en USD 2.400/finca. Contribución: el PACCGC es el primer programa de adaptación climática para la ganadería del páramo del Ecuador con evidencia cuantitativa completa, arquitectura institucional de cuatro niveles, mecanismo de financiamiento innovador (PSE Socio Páramo) y marco de M&E con indicadores de resultado verificables.

Nota. Elaboración propia.

15.3 Las Diez Conclusiones Sustantivas del Libro

15.3.1 Conclusiones sobre la Cadena Causal

C1. El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) influye en la producción de leche en el páramo del Carchi, principalmente a través del suelo, no de manera directa sobre las vacas. Un 68% del impacto del Índice de Oscilación del Norte (ONI) en los ingresos ganaderos del Tipo I se transmite por la ruta $T_{\text{soil}} \rightarrow \eta_{\text{Micro}} \rightarrow \eta_{\text{Nutri}} \rightarrow \text{PPNA/PC}$. Solo un 32% del efecto se origina por vías directas, como la temperatura del agua que consumen los animales y su confort térmico. Esta observación tiene una repercusión directa en cómo se diseñan las intervenciones: mejorar la calidad del suelo resulta ser más efectivo que simplemente tratar de aislar o calentar a los animales.

C2. El fósforo disponible en el suelo es el factor limitante más importante en toda la cadena causal. La escasez de P, que se encuentra en el 78% de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPAs) del Tipo I, con una media de 7,4 mg/kg frente al umbral de suficiencia que es de 20 mg/kg, restringe la mineralización del nitrógeno sin importar la temperatura.

Además, el fósforo es el nutriente que más sinergia presenta con el encalado; tras aplicar cal, el pH óptimo incrementa la eficacia de la roca fosfórica en un 40%. Corregir la deficiencia de P mediante la aplicación de cal en el suelo genera el mayor retorno agronómico por cada peso invertido en toda la cadena, con un BCR individual de 6,2 para IA-1.

C3. La asimetría entre El Niño y La Niña en la dinámica de nutrientes del suelo es un descubrimiento reciente que tiene importantes implicaciones para los protocolos de manejo. Durante un evento de El Niño, el nitrógeno se ve afectado principalmente (con una reducción del 58% en el N mineral en el Tipo I durante un fuerte fenómeno de El Niño) debido a la inhibición de la ureasa. Por otro lado, La Niña impacta más el potasio, con una disminución del 27% en el K disponible por lixiviación durante lluvias superiores a 40 mm/día. Esta asimetría requiere que se establezcan protocolos de contingencia diferenciados: se necesita aplicar fertilización nitrogenada de rescate durante El Niño y fertilización potásica preventiva en temporadas de La Niña.

15.3.2 Conclusiones sobre el Impacto Económico

C4. La pérdida anualizada esperada de 6,4 millones de dólares al año transforma al ENSO en el principal factor de riesgo estructural para el sector ganadero en Carchi, superando incluso la inestabilidad en el precio de la leche. Aunque la beta estructural del ONI en relación al ingreso ganadero es de -0,58, y el del precio de la leche es de +0,61, la diferencia es mínima, solo un 5%. Ambos factores son comparables en magnitud. Sin embargo, el ENSO representa un riesgo que el ganadero no puede gestionar por su cuenta, ya que no tiene control sobre el ONI ni sobre el precio que recibe. Por otro lado, la gestión del suelo puede contribuir a disminuir la vulnerabilidad ante el ENSO; de hecho, el paquete de adaptación puede reducir la EAL del Tipo I en un 65%. Si la política pública no aborda el riesgo climático como un elemento sistémico en el sector ganadero del Carchi, estará ignorando el mayor desafío que enfrenta este sector.

C5. La proyección del punto de inflexión de inviabilidad económica para el Tipo I entre 2038 y 2041 no es un destino inevitable. En el Capítulo 11, se demostró que, bajo el Escenario SA-B (RCP 8.5 con adaptación integral del 85%), el margen neto del Tipo I para 2050 sería un 62% superior al nivel base, marcando así la mayor ganancia entre todos los escenarios considerados. La brecha entre el escenario catastrófico (SA-A: inviabilidad del 100% de las fincas del Tipo I para 2050) y el escenario optimista (SA-B: margen neto +62%) se debe

precisamente al paquete de adaptación. La inviabilidad no es un futuro predeterminado; es el resultado de no tomar acciones en un periodo crítico de 12 a 17 años.

C6. El costo de adaptar es solo el 14% del costo de no adaptar; así que la adaptación se presenta como la inversión más rentable disponible para los ganaderos del Tipo I y para el MAG-Carchi. Comparando, el costo del Paquete Básico es de 820 dólares por finca al año, frente a 5.840 dólares por finca en un episodio de El Niño fuerte, lo que representa un 150% del margen neto anual. Esta relación de 1 a 7,1 entre el costo de adaptar y el costo de no adaptar constituye el argumento económico más convincente del documento. No existe ninguna inversión en la finca del Tipo I que ofrezca un retorno comparable al de corregir el pH y el fósforo del suelo.

15.3.3 Conclusiones sobre la Adaptación y la Política

C7. El sistema de alerta temprana ENSO-ONI (IA-5) es la intervención más destacada en términos de BCR, con un impresionante 8,4, y es la única que debería implementarse antes de cualquier otra medida. La anticipación de 45 a 60 días entre el aumento del ONI y la disminución del nitrógeno en el suelo del Tipo I se convierte en la palanca que este sistema utiliza para activar acciones preventivas. Sin este sistema, los ganaderos solo reaccionan una vez que la producción ya se ha visto afectada; en cambio, con el sistema, pueden actuar mientras el suelo aún tiene nitrógeno por encima del nivel crítico.

El tiempo de recuperación de 0,9 años y una TIR del 84% en IA-5 indican claramente que esta es, sin duda, la inversión más rentable dentro de todo el paquete.

C8. El triángulo de financiamiento para la adaptación —ganadero, Estado y usuarios del agua— representa una innovación institucional con un gran potencial. El programa de Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) Socio Páramo, con un costo de USD 28 a 42 por hectárea al año para ganaderos con una carga animal de hasta 1,2 UBAs por hectárea, puede disminuir el costo neto del paquete para los ganaderos del Tipo I de USD 820 a un rango entre USD 0 y 440 al año. Esto hace que la adaptación sea prácticamente gratuita para aquellos ganaderos que decidan adoptar prácticas de manejo sostenible en el páramo.

Además, el valor de los servicios ecosistémicos del páramo conservado, que oscila entre USD 10,2 y 20,3 millones al año, es de 62 a 124 veces más que el costo del programa público. Este

triángulo no solo es justo, sino que también es la manera más eficiente de movilizar financiamiento para la adaptación.

C9. La 'zona gris normativa' en la ganadería del páramo representa un gran obstáculo legal, y el Artículo 164-A del reglamento del COA es una reforma crítica que requiere atención urgente. Sin una habilitación legal clara para la ganadería en el páramo, facilitada por un plan de manejo sostenible, ni el PSE, ni el crédito, ni los subsidios son seguros desde el punto de vista jurídico.

Esta reforma es técnicamente sencilla (solo se necesita un artículo en el reglamento), legalmente sólida (respaldada por los artículos 281, 409 y 414 de la Constitución) y políticamente viable (no requiere aprobación legislativa, solo un decreto ejecutivo del MAATE). Se trata de la reforma más económica y con el mayor potencial multiplicador de todas las propuestas presentadas en el libro.

C10. La ventana de decisión de 12 a 17 años y la urgencia de dar inicio no son meras exageraciones; son el resultado de un análisis de Valor Actual Neto (VAN). Cada año de demora en la implementación del programa incrementa las pérdidas acumuladas del Tipo I en USD 2.400 por finca. Esto se debe a que los efectos del encalado y la fertilización fosfatada tardan entre 2 y 3 años en reflejarse en la Productividad Primaria Neta Agropecuaria (PPNA), mientras que las mejoras genéticas requieren de 4 a 6 años para impactar la producción.

Un programa que comience en 2025 tendrá sus efectos completos entre 2027 y 2031, justo en el período donde el riesgo de inviabilidad es más alto. Por otro lado, un programa que inicie en 2030 se estaría perdiendo esa ventana crítica.

15.4 Limitaciones del Estudio

Tabla 71.

Tabla Limitaciones Metodológicas del Estudio, Magnitud del Efecto sobre las Conclusiones Principales y Recomendaciones para Investigaciones Futuras

Limitación del Estudio	Magnitud del Efecto sobre las Conclusiones Principales	Recomendación para Investigaciones Futuras que Superen la Limitación
L-1: Representatividad muestral limitada	Efecto MODERADO sobre la generalización. El estudio captura bien la dinámica del páramo ganadero (3.200–	Ampliar el diseño muestral al corredor ganadero completo del Carchi (6 cantones, incluyendo

Limitación del Estudio	Magnitud del Efecto sobre las Conclusiones Principales	Recomendación para Investigaciones Futuras que Superen la Limitación
a los cantones Tulcán, Bolívar, Espejo y Mira del corredor del Carchi; no se incluyeron los sistemas ganaderos de altitud media del corredor (2.400–3.200 msnm) ni los sistemas de los cantones Montúfar y Huaca	4.000 msnm) pero puede no ser representativo de la zona de transición (2.400–3.200 msnm) donde las condiciones de suelo y la relación clima–producción pueden ser diferentes. Las estimaciones de la EAL provincial (USD 6,4 M/año) y del número de fincas del Tipo I (620) deben considerarse como límites inferiores del corredor completo del Carchi (incluyendo Montúfar y Huaca).	Montúfar y Huaca; n estimado = 520 UPAs adicionales a las 355 del estudio) y estratificar el análisis por zona altitudinal: < 2.800 msnm, 2.800–3.200 msnm y > 3.200 msnm. La comparación de los coeficientes del SEM entre las tres zonas altitudinales permitiría determinar si la cadena causal ENSO–suelo–leche identificada para el páramo (> 3.200 msnm) cambia cualitativamente en la zona de transición.
L-2: El modelo de ecuaciones estructurales del Cap. 9 asume linealidad en las relaciones entre las variables latentes y no captura potenciales no linealidades en la respuesta del N mineral a la temperatura del suelo (la relación puede ser convexa a bajas temperaturas y cóncava a temperaturas moderadas, según la literatura de biología del suelo)	Efecto BAJO a MODERADO sobre el coeficiente β_{31} ($T_{\text{soil}} \rightarrow \eta_{\text{Micro}}$). Las no linealidades en la respuesta microbiana a la temperatura son bien documentadas en suelos templados, pero menos estudiadas en Andisoles de alta altitud. Si la relación es convexa (la microbiología cae desproporcionadamente por debajo de 8°C), los coeficientes del SEM estarían subestimando el impacto de los episodios El Niño fuerte. Si es cóncava, los estarían sobreestimando. El efecto neto sobre las recomendaciones de política es bajo porque en ambos casos el encalado (que eleva el pH y aumenta la biomasa microbiana) sigue siendo la intervención de mayor palanca.	Estimar la forma funcional no paramétrica de la relación $T_{\text{soil}} \rightarrow$ actividad de urease y deshidrogenasa mediante un diseño experimental de incubación de suelos del Tipo I del Carchi a temperaturas controladas (4, 8, 12, 16, 20°C) con y sin enmienda calcárea. La estimación de la función de respuesta térmica de la microbiología del suelo del páramo del Carchi, calibrada con datos locales, reemplazaría el supuesto de linealidad del SEM del Cap. 9 con una función no paramétrica más precisa.
L-3: El horizonte de proyección de los escenarios al 2050 (Cap. 11) usa los escenarios climáticos globales RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC sin una downscaling estadístico específico para el	Efecto MODERADO sobre las proyecciones de producción de leche y viabilidad económica al 2035–2050. Los escenarios RCP downscaleados a escala provincial (resolución ~25 km del CMIP5) pueden no capturar la variabilidad espacial del clima dentro del corredor del Carchi (el Cap. 4 mostró gradientes de temperatura de 1,2–1,8°C entre Tulcán y Espejo a pesar de estar en el mismo corredor). El efecto sobre las recomendaciones de política es	Desarrollar proyecciones climáticas de alta resolución (< 1 km) para el corredor ganadero del Carchi usando técnicas de downscaling estadístico (BCSD: Bias Correction Spatial Disaggregation) sobre los modelos del CMIP6 (la sexta generación de modelos climáticos del IPCC, más refinada que el CMIP5 usado en este estudio). Las proyecciones de alta resolución permitirían identificar la

Limitación del Estudio	Magnitud del Efecto sobre las Conclusiones Principales	Recomendación para Investigaciones Futuras que Superen la Limitación
corredor ganadero del Carchi a escala de finca (< 1 km de resolución)	moderado: las metas del PACCGC al 2035 tienen un horizonte más corto que el mayor impacto de las proyecciones RCP (que se hace crítico principalmente después del 2040).	heterogeneidad espacial del riesgo climático dentro del corredor a escala de potrero — relevante para el diseño del sistema de alerta temprana de la Fase 2 del PACCGC.
L-4: El análisis del costo de producción (Cap. 10) no incluye los costos del trabajo no remunerado del hogar ganadero del Tipo I (en promedio 3,2 horas/día de trabajo familiar no contabilizado en la planilla de costos; estimación del diagnóstico participativo del proyecto)	Efecto MODERADO sobre el margen neto y el BCR privado del Tipo I. Si el trabajo familiar no remunerado se valora al jornal del mercado (USD 12,5/día en el Carchi rural en 2024), el costo adicional es de USD 14.625/año para el Tipo I (3,2 horas/día × 365 días × USD 12,5/8 horas), lo que reduciría el margen neto de USD 3.870 a USD -10.755 (negativo, si se valora a costo de oportunidad completo). Este resultado — el Tipo I tiene margen neto negativo cuando se valora el trabajo familiar — es consistente con la literatura de economía campesina andina (la lógica del ganadero del Tipo I no es maximizar el margen neto contable sino garantizar la seguridad alimentaria y la reproducción del hogar). El BCR privado del paquete de adaptación no cambiaría si se valorara el trabajo familiar de manera consistente antes y después de la adaptación (el incremento de producción del paquete no requiere más horas de trabajo familiar — la mejora del suelo y el forraje mejora la productividad sin aumentar la carga de trabajo).	Incorporar la valoración del trabajo no remunerado del hogar en el análisis de costos del Tipo I usando la metodología de la OIT para la economía del cuidado (OIT, 2018) y comparar con el jornal de mercado alternativo disponible en la zona (trabajo en floricultura, construcción o servicios en Tulcán). Esta valoración cambiaría el análisis del ingreso del Tipo I de un análisis de maximización del beneficio agrícola a un análisis de economía del hogar campesino, más apropiado para el segmento de menor escala del corredor.
L-5: La evaluación del impacto del cambio climático a largo plazo (Cap. 11) no modela el efecto potencial de los cambios en la frecuencia y la intensidad de los episodios ENSO bajo los escenarios de calentamiento global (la literatura científica más	Efecto ALTO sobre las proyecciones de viabilidad económica al 2041–2050. Si la frecuencia de El Niño fuerte aumenta del 8% al 50% bajo RCP 8.5 (el escenario pesimista de la literatura), el punto de inflexión de inviabilidad del Tipo I se adelanta de 2041 a 2028–2032, lo que reduciría drásticamente la ventana de decisión de adaptación de 12–17 años a 4–8 años. Las recomendaciones del Cap. 13 y 14 sobre la urgencia de las reformas normativas y el inicio de la Fase 0 del PACCGC son aún más urgentes bajo este escenario.	Desarrollar un análisis de sensibilidad del punto de inflexión de inviabilidad del Tipo I respecto a la frecuencia de El Niño fuerte bajo diferentes supuestos de cambio climático (5%, 10%, 20%, 33% y 50% de probabilidad anual de El Niño fuerte) usando un modelo de Monte Carlo para propagar la incertidumbre de la frecuencia ENSO a través de la cadena causal del SEM del Cap. 9 hasta el margen neto del Tipo I. Este análisis produciría una distribución de probabilidad del punto de inflexión de inviabilidad (en lugar de una estimación puntual con intervalo de

Limitación del Estudio	Magnitud del Efecto sobre las Conclusiones Principales	Recomendación para Investigaciones Futuras que Superen la Limitación
reciente sugiere que el cambio climático puede aumentar la frecuencia de El Niño fuerte al 50% bajo RCP 8.5, pero la incertidumbre es alta)		confianza) que sería más apropiada para la comunicación de la incertidumbre climática a los tomadores de decisiones.

Nota. Elaboración propia.

15.4.1 Una Nota sobre la Robustez Frente a las Limitaciones

El análisis de las cinco limitaciones ofrece una perspectiva alentadora para los objetivos prácticos del libro. Las conclusiones relacionadas con la política —el paquete de adaptación, la secuencia de reformas normativas y la hoja de ruta del PACCGC— se muestran sólidas a pesar de las limitaciones L-1 a L-4. Solo la L-5, que se refiere al cambio en la frecuencia del ENSO en el futuro debido al calentamiento global, podría tener un impacto significativo en las recomendaciones políticas. Sin embargo, su efecto es claro: hace que las sugerencias del libro sean aún más urgentes, no menos. Un incremento en la frecuencia de eventos de El Niño fuerte bajo el escenario RCP 8.5 no invalidaría el paquete de adaptación; de hecho, lo haría más necesario y urgente.

La fortaleza de las conclusiones frente a las limitaciones no debe interpretarse como una garantía de que el estudio sea perfecto. Esta robustez surge de la estructura metodológica del libro, que integra diversas fuentes de evidencia que se complementan entre sí. Esto incluye análisis fisicoquímicos de 240 muestras de suelo, la calibración de la biomasa forrajera utilizando RPM quincenal durante 18 meses, un SEM multinivel con 355 UPAs, un análisis econométrico de 10 años de precios y producción, y ACB con cotizaciones de precios de insumos actualizadas en 2024. Cuando múltiples métodos independientes llegan al mismo hallazgo, como la identificación del P y el pH como las limitaciones edáficas más relevantes del sistema, la solidez de ese hallazgo se vuelve elevada, incluso si cada método individual presenta sus propias limitaciones.

15.5 Agenda de Investigación Futura

Tabla 72.

Agenda de Investigación Futura: Seis Líneas de Investigación con Horizonte Temporal, Tipo de Estudio, Pregunta Específica y Metodología Recomendada

Línea de Investigación Futura	Horizonte Temporal y Tipo de Estudio	Pregunta Específica, Justificación con Base en las Limitaciones del Estudio y Metodología Recomendada
LI-1: Función de respuesta térmica no lineal de la microbiología de los Andisoles del páramo del Carchi al cambio de temperatura	Corto plazo (2025–2026). Diseño experimental de laboratorio (microcosmos de suelo a temperaturas controladas). Duración estimada: 12 meses.	Pregunta: ¿cuál es la forma funcional de la relación entre la temperatura del suelo (4–20°C) y la actividad de las enzimas urease y deshidrogenasa en los Andisoles de alta altitud del Carchi, con y sin corrección del pH mediante encalado dolomítico? Justificación: la L-2 del estudio identificó que el supuesto de linealidad del SEM del Cap. 9 puede subestimar o sobreestimar el impacto de El Niño fuerte sobre la microbiología del suelo. La estimación de la función no lineal permite recalibrar los coeficientes β_{31} y β_{41} del SEM con mayor precisión. Metodología recomendada: diseño factorial 5×3 (5 temperaturas: 4, 8, 12, 16, 20°C × 3 tratamientos: suelo sin encalar, suelo con dosis de mantenimiento, suelo con dosis correctiva); n = 15 submuestras compuestas de suelo del Tipo I del corredor (3 por cantón); medición de urease (método de Tabatabai & Bremner, 1972) y deshidrogenasa (método de Thalmann, 1968) a los 7, 14, 28 y 56 días de incubación. Ajuste de modelos de respuesta térmica: modelo Q10, modelo de Arrhenius modificado y modelo de Lloyd & Taylor (1994). El experimento puede realizarse en el laboratorio de suelos de la UPEC sin requerir infraestructura especializada adicional.
LI-2: Evaluación de la adopción y el impacto del Paquete Básico de Adaptación mediante un diseño cuasi-experimental de diferencia-en-diferencias	Mediano plazo (2025–2030). Diseño observacional cuasiexperimental con grupos de tratamiento y control. Duración: 5 años (evaluación de impacto de la Fase 1 del PACCGC).	Pregunta: ¿cuál es el impacto causal del Paquete Básico de Adaptación (IA-1, IA-2, IA-3, IA-5) sobre el pH del suelo, la PPNA, la producción de leche y el margen neto del Tipo I del corredor del Carchi, estimado mediante un diseño de diferencia-en-diferencias con el grupo de fincas del corredor que aún no han adoptado el paquete como grupo de control? Justificación: el estudio base (Caps. 10–12) estima el impacto del paquete de adaptación con base en modelos de producción y SEM derivados de datos observacionales — la inferencia causal de estos modelos está sujeta a sesgos de selección y confusión. El diseño de diferencia-en-diferencias con datos de panel a 5 años produce una estimación del efecto promedio del tratamiento (ATE) con mayor validez interna. Metodología: panel equilibrado de 186 fincas del Tipo I que adoptan el Paquete Básico en la Fase 1 del PACCGC (grupo de tratamiento) y 186 fincas del Tipo I del corredor que no lo adoptan en el mismo período (grupo de control, emparejadas por propensity score en los criterios: altitud, tamaño del hato, pH basal y distancia a la vía de acceso). Recolección de datos: anual (agosto–septiembre de cada año); indicadores de resultado: los 6 indicadores del marco de M&E del Cap. 14.

Línea de Investigación Futura	Horizonte Temporal y Tipo de Estudio	Pregunta Específica, Justificación con Base en las Limitaciones del Estudio y Metodología Recomendada
		Estimador: diferencia-en-diferencias con efectos fijos de finca y de año (modelo de panel de dos vías).
LI-3: Proyecciones climáticas de alta resolución para el corredor ganadero del Carchi y su efecto sobre el punto de inflexión de inviabilidad del Tipo I	Mediano plazo (2025–2028). Modelación climática y económica. Duración: 3 años.	Pregunta: ¿cuál es el punto de inflexión de inviabilidad económica del Tipo I del corredor del Carchi bajo proyecciones climáticas de alta resolución (< 1 km) del CMIP6 para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, considerando el rango de incertidumbre sobre la frecuencia futura de El Niño fuerte? Justificación: la L-3 y la L-5 identificaron que las proyecciones del estudio usan el CMIP5 a resolución provincial (~25 km) y no modelan el cambio en la frecuencia del ENSO bajo el calentamiento global. La L-5 en particular tiene efectos potencialmente altos sobre las recomendaciones de política: si la frecuencia de El Niño fuerte aumenta del 8% al 50% bajo SSP5-8.5, la ventana de decisión de adaptación se reduce de 12–17 años a 4–8 años, lo que requiere una revisión urgente de la hoja de ruta del Cap. 13. Metodología: downscaling estadístico BCSD del ensemble de 32 modelos del CMIP6 sobre el dominio del corredor del Carchi (resolución final: 1 km × 1 km); acoplamiento con el modelo de producción del Cap. 8 (relación PPNA–leche–margen neto) para generar distribuciones de probabilidad del margen neto del Tipo I a escala anual al 2050; análisis de Monte Carlo para propagar la incertidumbre del ENSO futuro a través de la cadena causal.
LI-4: Replicabilidad del modelo del PACCGC en otros corredores ganaderos del páramo ecuatoriano: Imbabura, Pichincha, Tungurahua y Bolívar	Mediano a largo plazo (2027–2032). Estudio comparativo multicorredor. Duración: 5 años.	Pregunta: ¿en qué medida los hallazgos del corredor del Carchi —la cadena causal ENSO–suelo–leche, los coeficientes del SEM, las pérdidas durante El Niño, el BCR del paquete de adaptación— son transferibles a otros corredores ganaderos del páramo de la sierra ecuatoriana, y qué factores moderan esa transferibilidad? Justificación: el Cap. 12 comparó el BCR del corredor del Carchi con cinco casos andinos y concluyó que el Carchi está en el cuartil superior de rentabilidad de la adaptación. Sin embargo, la mayoría de los corredores comparados son de Colombia y Perú; la replicabilidad dentro del Ecuador (en corredores como el Cotacachi-Imbabura, el páramo del Antisana en Pichincha o los páramos del Chimborazo) es una pregunta empírica que este estudio no responde. Metodología: aplicación del mismo protocolo metodológico del corredor del Carchi (análisis de suelo, calibración del SEM, estimación de la EAL, ACB del paquete de adaptación) en al menos tres corredores ganaderos del páramo ecuatoriano adicionales, con la misma tipología de cuatro sistemas pero recalibrada para cada corredor. Objetivo: producir un atlas de vulnerabilidad y adaptación de la ganadería del páramo ecuatoriano que permita priorizar la inversión pública en adaptación a escala nacional.

Línea de Investigación Futura	Horizonte Temporal y Tipo de Estudio	Pregunta Específica, Justificación con Base en las Limitaciones del Estudio y Metodología Recomendada
LI-5: Estudio longitudinal de la economía del hogar ganadero del Tipo I: trabajo no remunerado, estrategias de pluriactividad y umbrales de viabilidad desde la perspectiva de la economía campesina andina	Largo plazo (2026–2031). Estudio longitudinal mixto (cuantitativo + etnográfico). Duración: 5 años.	Pregunta: ¿cuál es la función de bienestar real del hogar ganadero del Tipo I del corredor del Carchi cuando se incorporan el trabajo no remunerado, las estrategias de pluriactividad (ingresos no agrícolas del hogar) y la lógica de reproducción del hogar campesino; y cuál es el umbral de viabilidad del Tipo I desde esta perspectiva más completa, ¿en comparación con el umbral de inviabilidad económica convencional (margen neto ≤ 0) del Cap. 11? Justificación: la L-4 identificó que el margen neto del Tipo I es negativo cuando se valora el trabajo familiar al jornal de mercado. Esto no significa que el Tipo I sea irracional en sus decisiones productivas: la literatura de economía campesina andina (Chayanov, 1966; Scott, 1976; Wolf, 1966) documenta extensamente que la lógica del hogar campesino no maximiza el margen neto sino la seguridad alimentaria y la minimización del riesgo de la subsistencia, dentro de una economía moral que incluye reciprocidad, trabajo comunitario y diversificación de fuentes de ingreso. Metodología: panel de 80 hogares del Tipo I seguidos durante 5 años con encuesta anual de ingresos completos del hogar (agrícolas y no agrícolas), diario de trabajo (horas por actividad), estrategias de pluriactividad y decisiones de inversión y desinversión en el hato; complementado con 20 entrevistas etnográficas profundas cada 18 meses. Indicadores: umbral de reproducción del hogar (no solo del margen neto de la finca), estrategias de diversificación del ingreso antes y después de los episodios El Niño, y cambios en el portafolio de actividades del hogar en función del margen neto ganadero.
LI-6: Diseño y piloto del seguro climático indexado dual (SID) para el corredor del Carchi: calibración actuarial, riesgo de base y evaluación de la disposición a pagar	Corto a mediano plazo (2025–2027). Diseño experimental de seguros y análisis actuarial. Duración: 2 años (diseño + piloto con 100 asegurados).	Pregunta: ¿cuál es el riesgo de base del SID propuesto en el Cap. 13 para las diferentes subzonas del corredor del Carchi, ¿cuál es la disposición a pagar del ganadero del Tipo I por la prima del seguro a diferentes niveles de cobertura y subsidio, y qué factores del diseño del seguro (variable índice, umbrales de activación, momento del pago) maximizan la adopción voluntaria del seguro? Justificación: el diseño del SID del Cap. 13 se basa en la mejor evidencia disponible del corredor, pero requiere una calibración actuarial rigurosa con datos históricos de pérdidas ganaderas a escala de finca (datos que el presente estudio no tiene en series largas) y una evaluación empírica del riesgo de base (la probabilidad de que el índice no refleje la pérdida individual del ganadero). La disposición a pagar del Tipo I por el seguro es una variable empírica, no deducible de los modelos econométricos del estudio, que determina la viabilidad comercial del SID. Metodología: análisis actuarial retrospectivo de pérdidas ganaderas durante El Niño 1997–1998, 2007–2009 y 2015–2016 en el corredor del Carchi (datos MAGAP + registros de los centros de

Línea de Investigación Futura	Horizonte Temporal y Tipo de Estudio	Pregunta Específica, Justificación con Base en las Limitaciones del Estudio y Metodología Recomendada
		acopio) para calibrar los umbrales y la prima del SID; experimento de elección discreta (DCE) con 240 ganaderos del corredor para estimar la disposición a pagar a diferentes niveles de cobertura (30%, 65%, 85%), primas (USD 40, 80, 120/año) y momentos de pago (durante el episodio vs. post-episodio); piloto operativo del SID con 100 asegurados voluntarios del Tipo I durante 2 años para evaluar el riesgo de base en condiciones reales.

Nota. Elaboración propia.

15.6 El Lugar del Libro en el Debate Científico sobre la Ganadería Andina y el Cambio Climático

15.6.1 La Contribución a la Literatura sobre la Cadena Causal ENSO–Producción Agropecuaria

La literatura que aborda el efecto del ENSO en la producción agropecuaria de los Andes es bastante amplia, como lo indican Barnett y Mahul (2007), Calderón et al. (2015) y Tapasco et al. (2015). Sin embargo, esta literatura está fragmentada: los estudios que analizan el impacto climático en el suelo, en términos de microbiología y nutrientes, se presentan por un lado, mientras que los que se centran en la producción forrajera aparecen por otro. A su vez, los estudios sobre la producción animal y los ingresos se encuentran también separados de los anteriores.

El libro *La Leche del Páramo*, respaldado por el conocimiento del equipo de investigación, se destaca como el primero en integrar toda esta cadena causal. Desde la anomalía oceánica del ENSO hasta el ingreso ganadero, presenta evidencia cuantitativa a escala de corredor y utiliza coeficientes estructurales estimados de manera simultánea a través de SEM.

Esta integración ha permitido descubrir dos hallazgos que las investigaciones parciales no lograron identificar: en primer lugar, la microbiología del suelo se establece como el eslabón más significativo en la amplificación del impacto climático, representando el 68% del efecto total mediado por esta vía. En segundo lugar, se observa una asimetría entre El Niño y La Niña en los nutrientes del suelo, específicamente entre el nitrógeno y el potasio.

Estos hallazgos plantean interrogantes para la literatura internacional: ¿es la influencia del suelo igualmente dominante en otros sistemas ganaderos de alta altitud en los Andes, como

Nariño, Boyacá, Cajamarca o el altiplano boliviano, o es algo específico del Andisol húmico del páramo del Carchi? ¿La asimetría entre N y K en relación con El Niño y La Niña se reproduce en otros sistemas de páramo o es una particularidad de los suelos con alta capacidad de intercambio catiónico del corredor del Carchi? La agenda de investigación LI-4, que busca replicar el modelo en otros corredores andinos, está diseñada precisamente para abordar estas preguntas.

15.6.2 La Contribución al Debate sobre el Diseño de los Seguros Climáticos para la Ganadería de Pequeña Escala

La investigación sobre seguros climáticos indexados en el contexto de la ganadería andina no es muy abundante. Los trabajos más destacados son el IBLI de Etiopía (Jensen et al., 2016) y el IBLIP de Mongolia (World Bank, 2005), que utilizan el NDVI del pastizal como su variable de índice.

Este libro sostiene que el ONI (Índice Oceánico de El Niño) es una mejor opción que el NDVI para el corredor del Carchi por varias razones. Primero, el ONI tiene un carácter predictivo, lo que significa que puede activar pagos antes de que se produzcan los daños, ya que hay un retraso entre el ONI y el impacto en la producción de forraje de entre 45 y 60 días. En cambio, el NDVI solo ofrece una descripción de los daños después de que ya son evidentes en el pastizal.

Segundo, el ONI es una variable oficial proporcionada por el NOAA, que está disponible en tiempo real y no se puede manipular por parte del asegurado. Y por último, la relación $R^2 = 0,68$ entre el ONI y las pérdidas ganaderas del Tipo I (como se muestra en la Tabla 10.5 del Capítulo 10) es considerablemente alta para un índice climático, comparable a los mejores resultados del BCR en el IBLI etíope.

Por todo esto, la agenda de investigación LI-6 se ha diseñado para confirmar estas ventajas comparativas mediante una calibración actuarial rigurosa.

15.6.3 La Posición del Corredor del Carchi en el Debate sobre la Viabilidad del Páramo Ganadero en el Siglo XXI

El debate sobre el futuro del páramo ganadero en los Andes latinoamericanos enfrenta dos posturas opuestas. Por un lado, está el ambientalismo estricto, que considera que la ganadería en el páramo es incompatible con la protección del ecosistema y pide su eliminación. Del otro

lado, se encuentra el produccionismo agrario, que ve el páramo como un espacio productivo que no se está aprovechando al máximo y defiende su intensificación.

No obstante, el libro presenta una tercera opción, que se basa en evidencia empírica. La ganadería del Tipo I en el corredor del Carchi, que opera con una carga animal $\leq 1,2$ UBAs/ha y gestiona su suelo ($\text{pH} \geq 5,6$; $\text{P} \geq 16$ mg/kg) puede coexistir con la conservación del páramo. Efectivamente, genera servicios ecosistémicos cuyo valor promedio oscila entre USD 10,2 y 20,3 millones al año. No es un problema; al contrario; es parte de la solución, siempre y cuando se establezcan las condiciones técnicas e institucionales necesarias para adaptar el sistema hacia uno que cause escasa degradación.

Esta postura, que observa a la ganadería del Tipo I como un gestor del páramo más que como un destructor de éste, posee importantes implicaciones políticas. Cuestiona la narrativa que excluye al ganadero del Tipo I al momento de acceder a herramientas de política ambiental, como el PSE. Además, justifica la inversión pública en su adaptación, considerándola como una política agraria y como una herramienta de conservación.

El IPGP (Índice de Persistencia Ganadera del Páramo) es un indicador que permitirá el monitoreo y la evaluación del programa, puesto que sostiene correctamente esta doble naturaleza: la retención de familias del páramo y la naturaleza del mismo son la dos caras de una misma moneda, siempre que las familias que se queden tengan un plan de manejo sostenible.

15.7 Epílogo: El Páramo No Espera

El argumento final del libro

El argumento central del libro plantea una cuestión que el análisis económico no puede resolver: ¿cuál es el valor de que una familia ganadera permanezca en el páramo del Carchi? ¿Qué importancia tiene que los hijos de los ganaderos del Tipo I no se desplacen a Tulcán o Quito? ¿Qué representa que las escuelas rurales en el páramo sigan funcionando, que los ríos del Carchi continúen regulando el agua que utilizan las ciudades más abajo, o que las vacas sigan pastando a 3.600 metros de altura en la misma tierra que sus abuelos solían recorrer?

Estos valores son invaluable — por eso el análisis costo-beneficio se refiere a ellos como 'co-beneficios no monetizados'.

Sin embargo, la experiencia adquirida a través de talleres de diagnóstico participativo del proyecto, los grupos focales con ganaderos del Tipo I en los cuatro cantones del corredor, las entrevistas con los extensionistas del MAG-Carchi y los recorridos por los potreros del páramo a primera hora del día, sugiere algo que los números no logran transmitir: las familias en el páramo del Carchi desean permanecer allí. Buscan las herramientas necesarias para quedarse. El libro ha evidenciado que esas herramientas ya existen, son técnicamente viables, económicamente rentables, institucionalmente factibles y coherentes con el marco legal actual.

Por ejemplo, el encalado y la fertilización con fosfato pueden transformar un suelo ácido y deficiente en fósforo en un terreno apto para una ganadería productiva en tan solo 18 meses. Un sistema de alerta temprana puede proporcionar al ganadero hasta 45 días de anticipación antes de que El Niño cause daños al 51% de su producción. El seguro climático puede convertir una pérdida catastrófica ocasional en un gasto anual predecible y manejable. Además, el PSE Socio Páramo puede hacer que la adaptación sea prácticamente gratuita para el ganadero que cuida del páramo.

No obstante, lo que el libro no puede decidir es si se llevarán a cabo las reformas normativas, si se reasignará el presupuesto del MAG-Carchi, si el GAD Provincial dará luz verde a la OPCAM, o si el primer análisis de suelo gratuito de la Fase 0 se realizará en 2025 o en 2030. Esas decisiones son de naturaleza política, y dependen de personas. El páramo no puede esperar. La ventana de decisión, que abarca de 12 a 17 años, tiene un límite en 2025 y otro en 2038-2041 —cuando el primer Tipo I promedio del corredor alcanza un punto crítico de inviabilidad si no se implementan adaptaciones. Cada año de demora representa un costo de USD 2.400 por finca en términos de pérdidas acumuladas. Y cada familia que abandona el páramo antes de que el programa llegue lleva consigo una historia única que no se podrá repetir, un pastizal que demorará décadas en recuperarse, y 14 hectáreas de páramo que quedan desprotegidas.

15.8 Síntesis del capítulo

- Los resultados del estudio indican que la vulnerabilidad de la ganadería de altura del Carchi ante la variabilidad climática resulta de la interacción de factores climáticos, edáficos, forrajeros y económicos. A partir del análisis se evidencia la importancia del suelo como mecanismo de transmisión de los efectos del ENOS hacia la producción de forraje y leche, así como también importantes diferencias entre los sistemas ganaderos del corredor. De aquí, se plantea un conjunto de medidas de adaptación orientadas al manejo del suelo, producción forrajera, gestión del riesgo climático y conservación de los páramos.
- El estudio, no obstante, también reconoce algunos limitantes asociados a la cobertura espacial, resolución de las proyecciones climáticas y supuestos de modelación, por lo que se propone que se realicen nuevas investigaciones para ampliar y validar los resultados en otros territorios andinos. En conjunto, la investigación supone una base para el diseño de políticas públicas diferenciadas que permitan mejorar la resiliencia económica y productiva de las familias ganaderas, reducir su exposición al cambio climático y fomentar un manejo sostenible de los ecosistemas de los páramos.

Bibliografía

- Acuerdo de París. (2015). Acuerdo de París bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. UNFCCC.
- Allen, M. S. (2000). Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 83(7), 1598–1624. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75030-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75030-2)
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. <https://www.asambleanacional.gob.ec/es/contenido/constitucion-de-la-republica-del-ecuador>
- Banco Central del Ecuador. (2022). *Cuentas provinciales 2022*. BCE.
- Banco Mundial. (2010). *The economics of adaptation to climate change*. World Bank.
- Balvanera, P., et al. (2012). Ecosystem services research in Latin America. *Ecosystem Services*, 2, 56–70.
- Barnett, B. J., & Mahul, O. (2007). Weather index insurance. *American Journal of Agricultural Economics*, 89(5), 1241–1247.
- Bates, D., et al. (2015). Linear mixed-effects models. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48.
- Brück, S., Toapanta, K., Buitrón, P., Pachecho, W., Ríos, P., y Teixeira, M. (2023). Impactos potenciales de los cambios estacionales y altitudinales en la descomposición enzimática de la turba en la región del páramo altoandino de Ecuador. *Ciencia del medio ambiente total*, 890. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164365>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B., y Wyseure, G. (2026). Variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones en zonas montañosas: un estudio de caso de los Andes del sur de Ecuador. *Revista de Hidrología*, 3-4(39), 413-421. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169406001144?via%3Dihub>

- Buytaert, W., Célleri , R., Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., y Hofstede , R. (2006). Impacto humano en la hidrología de los páramos andinos. *Earth-Science Review*, 79(1-2), 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Carvajal , L., Montenegro , F., Teran, G., Gladys, U., Nayeli , C., Cobo , R., y Herrera, M. (2025). Clasificación de la producción lechera a pequeña escala en la zona fronteriza Ecuador-Colombia. Un estudio comparativo de técnicas de aprendizaje automático. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 59, 2079-3480. https://www.redalyc.org/journal/6537/653781853001/653781853001_1.pdf
- Carvajal , L., Montenegro, G., y Urgilés, G. (2024). Determinantes socioeconómicos de las pequeñas y medianas explotaciones lecheras en la zona fronteriza entre Ecuador y Colombia. *Trop Anim Health Prod* , 56(254). <https://doi.org/10.1007/s11250-024-04092-x>
- Cayambe, J., Vásquez , M., y Heredia, M. (2024). Estimación de emisiones de CO2 y recomendaciones de manejo en fincas ganaderas de los Andes de Ecuador. *Idesia*, 42(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-34292024000200066>
- Costanza, R., Groot, R., Sutton, P., Ploeg, S., Sharolyn J. , A., Kubiszewski, I., . . . Turner, K. (2014). Cambios en el valor global de los servicios ecosistémicos. *Cambio ambiental global*, 26, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- De la Cruz, E., Simbaña, P., y Bonifaz, N. (2018). Gestión de calidad de leche de pequeños y medianos ganaderos de centros de acopio y queserías artesanales, para la mejora continua. caso de estudio: Carchi, Ecuador. *Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 124–136. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.10>
- Dell, M., et al. (2012). Temperature shocks. *AEJ Macroeconomics*, 4, 66–95.
- Dietz, S., & Stern, N. (2015). Climate risk. *Economic Journal*, 125, 574–620.
- Dominati, E., et al. (2010). Soil ecosystem services. *Ecological Economics*, 69, 1858–1868.
- Diego, M., y Patrick , W. (2011). Caracterización de las principales influencias climáticas externas sobre las precipitaciones y la temperatura del aire en la cuenca del río Paute - Andes del Sur de Ecuador. *askana*, 2(1), 31–47. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.03>

- Franco, W., Peña, J., Rosero, J., y Quintero, O. (2016). Clasificación Interpretativa de Suelos Volcánicos para Manejo y Restauración en el Valle Interandino, Carchi-Ecuador. *Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. https://www.researchgate.net/publication/315762648_Clasificacion_Interpretativa_de_Suelos_Volcanicos_para_Manejo_y_Restauracion_en_el_Valle_Interandino_Carchi-Ecuador
- Franco, W., Peñafiel, M., Cerón, C., y Freire, E. (2026). Biodiversidad productiva y asociada en el Valle Interandino Norte del Ecuador. *Bioagro*, 28(3), 181-192. <https://ve.scielo.org/pdf/ba/v28n3/art05.pdf>
- Goslee, S. (2020). Estimación de la biomasa de especies de pastos a partir de la cobertura del dosel. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 6(1), e20038. <https://doi.org/10.1002/cft2.20038>
- Hayes, A. (2022). *Introducción al análisis de procesos de mediación, moderación y condicionales*. The Guilford Press.
- Hernan, M., y Robins, J. (2020). *Causal inference: What if*. Chapman. Chapman & Hall/CRC. https://static1.squarespace.com/static/675db8b0dd37046447128f5f/t/677676888e31cc50c2c33877/1735816881944/hernanrobins_WhatIf_2jan25.pdf
- Llerena, M., Alisher, M., y Qaim, M. (2025). Efectos de las perturbaciones recurrentes por lluvias en la pobreza y la distribución del ingreso en las zonas rurales de Ecuador. *World Development*, 195(107107). <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2025.107107>
- Medina, G., Pereda, J., y Curbelo, L. (2024). Producción de leche en Ecuador, su proyección a partir de escenarios con énfasis en la cuenca baja del Guayas. *Revista de Producción Animal*, 36(1). <https://rpa.reduc.edu.cu/index.php/rpa/article/view/e137>
- Mosquera, G., Marin, F., Feyen, J., Céleri, R., Lutz, B., Windhorst, D., y Crespo, P. (2020). A field, laboratory, and literature review evaluation of the water retention curve of volcanic ash soils: How well do standard laboratory methods reflect field conditions? *Hydrological Processes*, 35(1). <https://doi.org/10.1002/hyp.14011>
- Nahar, A., Farhana, A., Richard, J., y Md, R. (2022). Evaluación de los factores y las limitaciones para el desarrollo de la cadena de valor de los productos lácteos en Bangladesh. *Heliyon*, 8(10), e10787.

- Poulenard , J., Podwojewski, P., y Jules , A. (2003). Características de los Andisoles no alofánicos con propiedades hídricas de los páramos ecuatorianos. *Geoderma*, 117(3-4), 267–281. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9)
- Rosales , H., Hernández , S., Aguiar, D., Rosero, D., Pérez, L., y Rosero , M. (2018). Evaluación de la calidad del suelo en Andosoles mediante sistemas silvopastoriles. *La revista Open Agriculture*, 12, 207-214. <https://doi.org/10.2174/1874331501812010207>
- Staß, S., Dorau, K., Aguirre, P., Schwiebert, P., y Mansfeldt, T. (2025). Efectos del uso del suelo sobre el carbono orgánico en suelos de ceniza volcánica andina. *Revista de Nutrición Vegetal y Ciencia del Suelo*, 188(2), 196-208. <https://doi.org/10.1002/jpln.202400010>
- Teran , R., y Cobo. (2017). Factores determinantes de manejo en tambos del Carchi, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 51(2), 175-182. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193057228002.pdf>
- Zehetner, F., y Miller, W. (2006). Características de erosionabilidad e infiltración de escorrentía de suelos de ceniza volcánica a lo largo de una climosecuencia altitudinal en los Andes ecuatorianos. *CADENA*, 65(3), 201-213. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816205002018?via%3Dihub>
- Zehetner, F., y Miller, W. (2006). Variaciones del suelo a lo largo de un gradiente climático en un agroecosistema andino. *Geoderma*, 137(1-2), 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.005>
- Zimmer , A., Timothy , B., y Luzzadder, S. (s.f.). La temperatura del suelo y las condiciones iniciales locales impulsan la acumulación de carbono y nitrógeno en los suelos proglaciales jóvenes de los Andes tropicales y los Alpes europeos.